



**SKRIPSI - ME 141501**

**ANALISA PERHITUNGAN SISTEM PROPULSI LISTRIK  
WAHANA BAWAH AIR 60 M MENGGUNAKAN MOTOR DC  
2X1850 KW 380 V YANG DICATU DAYA 190 VDC 10260 AH  
MENGGUNAKAN OHMFORMER DAN 115 VDC 10260 AH  
TANPA MENGGUNAKAN OHMFORMER**

Muhammad Agus Sulaiman  
NRP 0421124000042

Dosen Pembimbing  
Ir. Sardono Sarwito, M.SC

Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## **SKRIPSI – ME 141501**

**ANALISA PERHITUNGAN SISTEM PROPULSI LISTRIK WAHANA  
BAWAH AIR 60 M MENGGUNAKAN MOTOR DC 2X1850 KW 380 V  
YANG DICATU DAYA 190 VDC 10260 AH MENGGUNAKAN  
OHMFORMER DAN 115 VDC 10260 AH TANPA MENGGUNAKAN  
OHMFORMER**

Muhammad Agus Sulaiman  
NRP 04211240000042

Dosen Pembimbing  
Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.

Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## **BACHELOR THESIS – ME 141501**

**ANALYSIS OF ELECTRIC PROPULSION PERFORMANCE ON  
SUBMERSIBLE 60 M WITH MOTOR DC 2X1850 KW, 380 V SUPPLY  
POWER 10260 AH AT VOLTAGE 190 VDC USING OHMFORMER  
AND WITHOUT OHMFORMER AT VOLTAGE 115 VDC**

Muhammad Agus Sulaiman  
NRP 04211240000042

Supervisor  
Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.

Department of Marine Engineering  
Faculty of Marine Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **LEMBAR PENGESAHAN**

***ANALISA PERHITUNGAN SISTEM PROPULSI LISTRIK WAHANA BAWAH  
AIR 60 M MENGGUNAKAN MOTOR DC 2X1850 KW;380 V YANG DICATU  
DAYA 190 VDC; 10260 AH MENGGUNAKAN OHMFORMER DAN 115  
VDC;10260 AH TANPA MENGGUNAKAN OMHFORMER***

### **SKRIPSI**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada Bidang Studi Marine Electrical and Automation System (MEAS)

Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**MUHAMMAD AGUS SULAIMAN**  
**NRP. 04211240000042**

Disetujui oleh Pembimbing Skripsi:

1. Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.

(  )

Surabaya  
Januari 2018

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISA PERHITUNGAN SISTEM PROPULSI LISTRIK WAHANA BAWAH  
AIR 60 M MENGGUNAKAN MOTOR DC 2X1850 KW;380 V YANG DICATU  
DAYA 190 VDC; 10260 AH MENGGUNAKAN OHMFORMER DAN 115  
VDC;10260 AH TANPA MENGGUNAKAN OHMFORMER**

## SKRIPSI

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada Bidang Studi Marine Electrical and Automation System (MEAS)

Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**MUHAMMAD AGUS SULAIMAN**  
**NRP. 04211240000042**

Disetujui oleh Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan:



Surabaya  
Januari 2018

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

**ANALISA PERHITUNGAN SISTEM PROPULSI LISTRIK WAHANA BAWAH  
AIR 60 M MENGGUNAKAN MOTOR DC 2X1850 KW;380 V YANG DICATU  
DAYA 190 VDC; 10260 AH MENGGUNAKAN OHMFORMER DAN 115  
VDC;10260 AH TANPA MENGGUNAKAN OHMFORMER**

**Nama** : Muhammad Agus Sulaiman  
**NRP** : 04211240000042  
**Departemen** : Teknik Sistem Perkapalan, FTK - ITS  
**Pembimbing I** : Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.

***Abstrak***

*Sistem propulsi elektrik adalah sistem pada wahana bawah air yang menggunakan motor listrik sebagai mesin penggerak menggantikan posisi atau kinerja dari mesin utama. Penggunaan mesin diesel sebagai tenaga penggerak baling baling memiliki beberapa permasalahan dan kelemahan yaitu mesin diesel tidak dapat beroperasi pada saat wahana bawah air sedang beroperasi di bawah permukaan air laut. Untuk mengatasi masalah tersebut diperlukan alternatif sebagai penggerak wahana bawah air. Alternatif tersebut menggunakan motor DC. Wahana bawah air menggunakan sistem propulsi elektrik dengan motor DC karena motor DC memiliki kelebihan pengaturan putaran yang mudah dilakukan dan tidak menimbulkan kebisingan pada saat wahana bawah air sedang menyelam.*

*Penulisan skripsi ini akan mengkaji penggunaan motor DC sebagai sistem propulsi elektrik pada wahana bawah air yang memiliki panjang 59.7 m. Rangkaian sistem propulsi yang digunakan berupa 2 buah motor DC yang disusun secara seri dan dicatu daya berupa baterai dan generator. Rangkaian sistem propulsi yang dikaji adalah menggunakan ohmformer dan tanpa menggunakan ohmformer. Selanjutnya rangkaian tersebut disimulasikan menggunakan software MATLAB. Kemudian data hasil simulasi adalah putaran dan torsi.*

*Hasil yang diperoleh pada rangkaian menggunakan ohmformer adalah nilai kecepatan dan daya wahana bawah air mencapai nilai yang lebih besar dibandingkan rangkaian tanpa menggunakan ohmformer. Hal ini dikarenakan rangkaian menggunakan ohmformer yang dicatu daya oleh generator dapat mengontrol tegangan masuk ke motor DC penggerak utama. Sedangkan rangkaian tanpa menggunakan ohmformer mempunyai nilai tegangan tetap dari baterai. Selanjutnya rangkaian menggunakan ohmformer dapat digunakan untuk kecepatan silent run, sailing run (jelajah) dan pengejaran. Kemudian rangkaian tanpa menggunakan ohmformer dapat digunakan untuk kecepatan sailing run (jelajah).*

**Kata kunci:** *Propulsi listrik, Motor DC, Ohmformer, MATLAB*

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

**ANALYSIS OF ELECTRIC PROPULSION PERFORMANCE ON  
SUBMERSIBLE 60 M WITH MOTOR DC 2X1850 KW 380 V USING  
OHMFORMER AT VOLTAGE 190 VDC 10260 AH AND WITHOUT USING  
OHMFORMER AT VOLTAGE 115 VDC 10260 AH**

**Name** : Muhammad Agus Sulaiman  
**ID Number** : 04211240000042  
**Department** : Marine Engineering, FTK - ITS  
**Supervisor I** : Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.

***Abstract***

*Electric propulsion system is the ship propulsion system using electric motor to replace performance of main engine. The application of diesel engine as propulsion system have some problems and weaknesses such as diesel engine is not able to operate when submersible ship at submerge condition. To overcome that problems in submersible ship, alternative solution of ship propulsion is required. DC motor can be used as this alternative solution. Submersible ships use DC motor as electric propulsion system because DC motor has advantages of speed control and does not make noise when submersible ship at submerge condition.*

*This thesis will review the application of DC motor as electric propulsion system on submersible ship with length 59,7 meters. Design of electric propulsion system are using two DC motor which connected in series. Battery and generator as it's power supply. Design of electric propulsion system will be reviewed there are using ohmformer dan without using ohmformer. Next, that's design will be simulated using MATLAB. Then result of simulaton are speed / rotation and torque.*

*The result of design using ohmformer are value of speed and power greater than without using ohmformer. Because of using ohmformer can control input voltage of DC motor which generator as it's power supply. While, design of without using ohmformer has constant input voltage which battery as it's power supply. Next, design of using ohmformer can be used for silent run (low speed), sailing run (medium speed) and quick run (high speed). Then design of without using ohmformer can be used for sailing run (medium speed).*

**Keyword:** *Electric propulsion system, DC motor, Ohmformer, MATLAB*

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis haturkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan anugerah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi beserta pembuatan laporan yang berjudul:

***ANALISA PERHITUNGAN SISTEM PROPULSI LISTRIK WAHANA BAWAH  
AIR 60 M MENGGUNAKAN MOTOR DC 2X1850 KW;380 V YANG DICATU  
DAYA 190 VDC; 10260 AH MENGGUNAKAN OHMFORMER DAN 115  
VDC;10260 AH TANPA MENGGUNAKAN OHMFORMER***

Skripsi ini disusun untuk memenuhi persyaratan bagi seorang mahasiswa untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan kali ini penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu hingga terselesainya laporan Skripsi ini, khususnya kepada:

1. Allah SWT yang telah menganugerahkan segala nikmat kepada penulis terutama nikmat kesehatan dan ilmu pengetahuan.
2. Orang tua penulis Alm. Muhammad Adam (Ayah), Alm. Misnawiyah (Ibu), serta Mujiati (Ibu Tiri), selaku keluarga penulis yang tiada hentinya memberikan doa, semangat, serta motivasi kepada penulis dalam pengerjaan skripsi.
3. Bapak Dr. Eng. M. Badrus Zaman, S.T., M.T. dan Bapak Prof. Dr. Semin, S.T, M.T. selaku Ketua dan Sekretaris Departemen Teknik Sistem Perkapalan.
4. Bapak Indra Ranu Kusuma, S.T, M.Sc selaku Kaprodi S1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan.
5. Bapak Ir. Sardono Sarwito, M.Sc. selaku dosen wali yang memberi motivasi kepada penulis selama menjadi mahasiswa di Departemen Departemen Sistem Perkapalan.
6. Bapak Ir. Sardono Sarwito, M.Sc. selaku dosen pembimbing skripsi yang selalu mengarahkan dan membimbing penulis dalam pengerjaan skripsi.
7. Anggota Kerukunan Pelajar Mahasiswa Kepulauan Riau – Surabaya / KPMKR – Surabaya yang senantiasa memberikan semangat.
8. Teman – teman angkatan BISMARCK'12 yang senantiasa memberikan semangat.
9. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis sangat menyadari bahwa laporan Skripsi ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat dibutuhkan untuk menyempurnakan laporan Skripsi ini. Vivat!

Surabaya, Januari 2018  
Penulis

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	1
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan .....	2
1.5 Manfaat .....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	3
2.1 Wahana Bawah Air .....	3
2.1.1 Prinsip Dasar .....	3
2.1.2 Jenis Jenis Wahana Bawah Air .....	3
2.1.3 Kecepatan Jelajah Wahana Bawah Air .....	4
2.1.4 Perhitungan Tahanan pada Wahana Bawah Air.....	5
2.1.5 Perhitungan Daya pada Wahana Bawah Air .....	6
2.2 Motor Listrik Arus Searah .....	7
2.2.1 Mesin Arus Searah .....	7
2.3 Generator DC .....	8
2.3.1 Prinsip Kerja Generator DC.....	8
2.3.2 Generator Penguat Terpisah.....	9
2.3.3 Generator Belitan <i>Shunt</i> .....	10
2.3.4 Generator Belitan <i>Kompound</i> .....	11
2.3.5 Kontruksi Generator DC .....	12
2.4 Motor DC .....	12
2.4.1 Pengertian .....	12
2.4.2 Prinsip Kerja .....	13
2.4.3 Jenis Jenis Motor DC .....	14
2.4.4 Karakteristik Motor DC .....	19
2.4.5 Pengaturan Putaran Motor DC .....	20
2.4.6 Daya <i>Output</i> Motor DC.....	23
2.5 Sistem Propulsi Elektrik .....	23
2.6 Peraturan Bureau Veritas untuk Sistem Propulsi Elektrik .....	24
2.7 Software MATLAB .....	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	27
3.1 Studi Literatur .....	27
3.2 Studi Empiris .....	28
3.3 Perhitungan Tahanan pada Wahana Bawah Air.....	28
3.4 Perhitungan Torsi pada Wahana Bawah Air.....	28
3.5 Penentuan data & variasi rangkaian sistem propulsi.....	28

3.5.1 Rangkaian seri motor DC menggunakan ohmformer .....	29
3.5.2 Rangkaian seri motor DC tanpa menggunakan ohmformer.....	30
3.6 Proses Simulasi .....	30
3.7 Analisa .....	30
3.8 Kesimpulan dan Saran .....	30
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....	31
4.1 Perhitungan Tahanan Wahana Bawah Air .....	31
4.1.1 Luasan Permukaan Basah .....	31
4.1.2 Bare Hull Resistance .....	32
4.1.3 Appendages Resistance.....	33
4.1.4 Total Tahanan .....	33
4.2 Perhitungan Torsi .....	34
4.2.1 Nilai EHP (Effective Horsepower) .....	34
4.2.2 Nilai PC (Propulsive Coefficient) .....	34
4.2.3 Nilai SHP (Shaft Horsepower).....	35
4.2.4 Nilai PHP (Propulsive Horsepower) .....	35
4.2.5 Nilai Torsi .....	35
4.2.6 Nilai Koefisien Torsi.....	35
4.3 Simulasi Rangkaian menggunakan Simulink-MATLAB .....	36
4.3.1 Rangkaian I .....	36
4.3.2 Rangkaian II.....	39
4.4 Perhitungan BHP dan Kecepatan Wahana Bawah Air .....	42
4.4.1 Rangkaian I .....	42
4.4.2 Rangkaian II.....	44
4.5 Perhitungan Daya <i>Output</i> Motor Penggerak Utama .....	46
4.5.1 Rangkaian I .....	46
4.5.2 Rangkaian II.....	47
4.6 Analisa <i>Speed – Power Performance</i> .....	48
4.6.1 Rangkaian I .....	49
4.6.2 Rangkaian II.....	50
4.7 Analisa Grafik.....	52
4.7.1 Rangkaian I .....	52
4.7.2 Rangkaian II.....	55
BAB V KESIMPULAN.....	59
5.1 Kesimpulan .....	59
5.2 Saran .....	59
DAFTAR PUSTAKA .....	61
LAMPIRAN.....	63
BIODATA PENULIS .....	71

## DAFTAR GAMBAR

<i>Gambar 2. 1 Rencana umum pada wahana bawah air konvensional.....</i>	<i>3</i>
<i>Gambar 2. 2 Ilustrasi tahanan pada wahana bawah air.....</i>	<i>5</i>
<i>Gambar 2. 3 Skema sistem propulsi elektrik.....</i>	<i>6</i>
<i>Gambar 2. 4 (a) Stator mesin DC dan medan magnet (b) Fisik Mesin DC.....</i>	<i>8</i>
<i>Gambar 2. 5 Kaidah Tangan Kanan Flemming .....</i>	<i>8</i>
<i>Gambar 2. 6 Model prinsip kerja generator DC .....</i>	<i>9</i>
<i>Gambar 2. 7 (a) Rangkaian Generator DC Penguat terpisah.....</i>	<i>9</i>
<i>Gambar 2. 8 Karakteristik tegangan generator penguat terpisah.....</i>	<i>10</i>
<i>Gambar 2. 9 Rangkaian generator belitan shunt .....</i>	<i>10</i>
<i>Gambar 2. 10 Karakteristik tegangan generator shunt.....</i>	<i>11</i>
<i>Gambar 2. 11 Rangkaian generator compund.....</i>	<i>11</i>
<i>Gambar 2. 12 Karakteristik tegangan generator Kompound .....</i>	<i>11</i>
<i>Gambar 2. 13 Bentuk fisik generator DC .....</i>	<i>12</i>
<i>Gambar 2. 14 Konstruksi motor arus searah bagian stator .....</i>	<i>12</i>
<i>Gambar 2. 15 Konstruksi motor arus searah bagian rotor .....</i>	<i>13</i>
<i>Gambar 2. 16 Prinsip Kerja Motor DC.....</i>	<i>13</i>
<i>Gambar 2. 17 Rangkaian Motor DC Penguat Terpisah.....</i>	<i>14</i>
<i>Gambar 2. 18 Karakteristik Motor DC Shunt.....</i>	<i>15</i>
<i>Gambar 2. 19 Rangkaian Listrik Motor DC Shunt.....</i>	<i>15</i>
<i>Gambar 2. 20 Karakteristik Motor DC Seri .....</i>	<i>16</i>
<i>Gambar 2. 21 Rangkaian Listrik Motor DC Seri.....</i>	<i>17</i>
<i>Gambar 2. 22 Karakteristik Motor Kompon DC .....</i>	<i>17</i>
<i>Gambar 2. 23 Rangkaian Motor DC Kompon Panjang .....</i>	<i>18</i>
<i>Gambar 2. 24 Rangkaian Motor DC Kompon Pendek.....</i>	<i>18</i>
<i>Gambar 2. 25 Kurva karakteristik torsi – arus jangkar (<math>T_a/I_a</math>).....</i>	<i>19</i>
<i>Gambar 2. 26 Kurva karakteristik putaran – arus jangkar (<math>n/I_a</math>).....</i>	<i>20</i>
<i>Gambar 2. 27 Kurva karakteristik putaran – torsi (<math>n/T_a</math>).....</i>	<i>20</i>
<i>Gambar 2. 28 Rangkaian ekivalen pengaturan kecepatan .....</i>	<i>21</i>
<i>Gambar 2. 29 Rangkaian ekivalen pengaturan kecepatan .....</i>	<i>21</i>
<i>Gambar 2. 30 Rangkaian Ekivalen Pengaturan Kecepatan Metode Ward Leonard.....</i>	<i>22</i>
<i>Gambar 2. 31 Skema Electric Drive. ....</i>	<i>24</i>
<i>Gambar 2. 32 Contoh Penggunaan SimMechanics .....</i>	<i>25</i>
 <i>Gambar 3. 1 Flow chart metodologi penelitian.....</i>	 <i>27</i>
<i>Gambar 3. 2 Gambar rangkaian I.....</i>	<i>29</i>
<i>Gambar 3. 3 Gambar rangkaian II.....</i>	<i>30</i>

<i>Gambar 4. 1 Contoh model wahana bawah air.....</i>	<i>31</i>
<i>Gambar 4. 2 Skema efisiensi system propulsi .....</i>	<i>34</i>
<i>Gambar 4. 3 Rangkaian I menggunakan ohmformer.....</i>	<i>36</i>
<i>Gambar 4. 4 Rangkaian I menggunakan Simulink .....</i>	<i>37</i>
<i>Gambar 4. 5 Rangkaian II tanpa menggunakan ohmformer .....</i>	<i>39</i>
<i>Gambar 4. 6 Rangkaian II menggunakan Simulink.....</i>	<i>40</i>
<i>Gambar 4. 7 Grafik tegangan masuk - kecepatan pada rangkaian I.....</i>	<i>52</i>
<i>Gambar 4. 8 Karakteristik putaran fungsi tegangan jangkar.....</i>	<i>53</i>
<i>Gambar 4. 9 Grafik speed power performance rangkaian I.....</i>	<i>54</i>
<i>Gambar 4. 10 Grafik kondisi baterai - kecepatan pada rangkaian II. ....</i>	<i>55</i>
<i>Gambar 4. 11 Grafik kondisi baterai - penurunan nilai tegangan rangkaian II. ....</i>	<i>56</i>
<i>Gambar 4. 12 Grafik speed power performance rangkaian II. ....</i>	<i>57</i>

## DAFTAR TABEL

<i>Tabel 4. 1 Tipe tipe nilai <math>C_{\tau r}</math> .....</i>	<i>32</i>
<i>Tabel 4. 2 Data putaran dan torsi motor hasil simulasi rangkaian I .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabel 4. 3 Data putaran dan torsi motor hasil simulasi rangkaian II .....</i>	<i>41</i>
<i>Tabel 4. 4 Table nilai w dan t .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabel 4. 5 Daya dan kecepatan wahana bawah air pada rangkaian I .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabel 4. 6 Table nilai w dan t .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabel 4. 7 Daya dan kecepatan wahana bawah air pada rangkaian II .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabel 4. 8 Daya output motor pada rangkaian I .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabel 4. 9 Daya output motor pada rangkaian II .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabel 4. 10 Speed power performance pada rangkaian I .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabel 4. 11 Speed power performance pada rangkaian II .....</i>	<i>51</i>

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Wahana bawah air adalah wahana benam yang bergerak di bawah permukaan air, umumnya digunakan untuk tujuan dan kepentingan militer. Selain digunakan untuk kepentingan militer, wahana bawah air juga digunakan untuk ilmu pengetahuan air laut dan air tawar dan juga untuk bertugas di kedalaman yang tidak sesuai untuk penyelam manusia.

Sistem propulsi wahana bawah air yang biasa digunakan adalah sistem propulsi diesel elektrik dan nuklir. Pada wahana bawah air bertenaga diesel elektrik, mesin diesel dihidupkan jika wahana bawah air berada dipermukaan air untuk mengisi baterai sebagai sumber listrik menghidupkan motor listrik untuk memutar baling-baling jika sedang menyelam. Berbeda dengan wahana bawah air bertenaga nuklir yang menggunakan reaktor air bertekanan atau PWR (pressurizer water reactor) sebagai sumber tenaga memutar turbin utama yang menggerakkan baling-baling.

Salah satu keunggulan wahana bawah air bertenaga diesel elektrik dapat dikatakan hanya pada desain yang lebih kecil dibandingkan wahana bawah air bertenaga nuklir. Kemungkinan terdeteksi sonar lebih kecil serta mampu bermanuver dengan sudut derajat yang cukup tajam.

Sistem propulsi diesel elektrik biasanya menggunakan motor DC sebagai motor listriknya. Hal ini dikarenakan kecepatan putaran pada motor DC mudah diatur dan tidak menimbulkan kebisingan. Pada akhirnya diharapkan dapat pula mengatur putaran atau kecepatan yang dihasilkan pada wahana bawah air. Oleh karena itu dibutuhkan simulasi dan perhitungan penggunaan motor listrik DC sebagai sistem propulsi diesel elektrik pada wahana bawah air.

### **1.2 Perumusan Masalah**

Permasalahan dari pelaksanaan skripsi ini adalah berikut:

1. Bagaimana perbedaan karakteristik (torsi serta putaran) pada rangkaian seri motor DC menggunakan ohmformer dan tanpa menggunakan ohmformer pada sistem propulsi tersebut?
2. Bagaimana memilih rangkaian yang efisien untuk sistem propulsi tersebut?
3. Bagaimana perbandingan efisiensi rangkaian tersebut terhadap sistem propulsi wahana bawah air?

### **1.3 Batasan Masalah**

Adapun batasan masalahnya adalah sebagai berikut :

1. Rangkaian seri motor DC menggunakan ohmformer dan tanpa menggunakan ohmformer sesuai referensi
2. Wahana bawah air dengan panjang 60 m
3. Tegangan 190 VDC menggunakan ohmformer dan 115 VDC tanpa menggunakan ohmformer
4. Analisa didapatkan dari hasil simulasi dengan menggunakan software MATLAB serta analisa secara teoritis berdasarkan rumus yang sudah ada.
5. Analisa setiap rangkaian dibatasi hanya pada performance pada setiap rangkaian
6. Percobaan secara nyata tidak dilakukan dilakukan

### **1.4 Tujuan**

Dari perumusan masalah diatas maka dapat ditentukan tujuan dari skripsi ini adalah mendapatkan perbedaan karakteristik pada rangkaian seri motor DC menggunakan ohmformer dan tanpa menggunakan omformor, yaitu:

1. Nilai torsi yang dibutuhkan dan putaran yang dihasilkan oleh sistem propulsi tersebut.
2. Nilai kecepatan dan daya yang dihasilkan oleh sistem propulsi tersebut.
3. Menentukan efisiensi untuk sistem propulsi tersebut.

### **1.5 Manfaat**

Manfaat dari skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Memberi data karakteristik dan performa pada setiap variasi rangkaian sehingga dapat diterapkan sebagai sistem penggerak propulsi wahana bawah air yang sesuai.
2. Sebagai bahan pembelajaran selanjutnya untuk sistem propulsi tersebut.



## BAB II

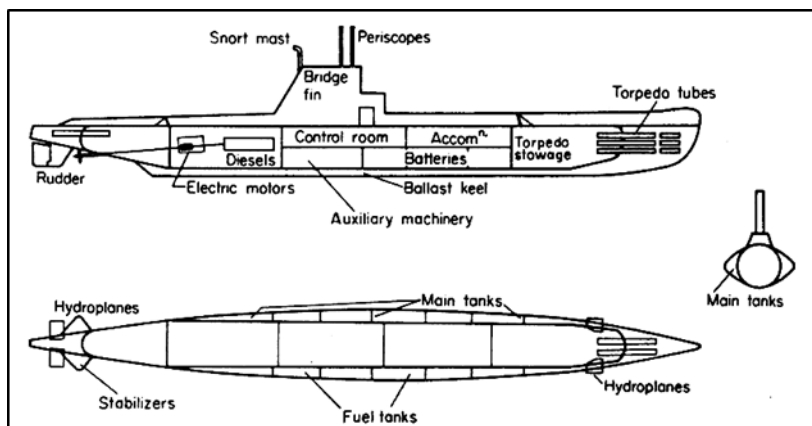
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Wahana Bawah Air

##### 2.1.1 Prinsip Dasar

Wahana bawah air adalah sebuah wahana benam dengan propulsi mandiri yang mampu membawa personil dan / atau penumpang saat beroperasi dibawah air, menyelam, dipermukaan dan memiliki daya apung. Tekanan internal yang biasanya dipertahankan pada atau dekat satu atmosfer (ABS, 2015).

Wahana bawah air menggunakan sirip atau hydroplanes untuk membantu tubuhnya tenggelam seiring dengan kecepatan yang meningkat. Hal yang sama dilakukan saat wahana bawah air secara dinamis berusaha keluar menuju permukaan air. Untuk menyelam statis, wahana bawah air memiliki tangki pemberat yang dapat diisi dengan udara maupun air. Jadi pada saat tenggelam, wahana bawah air mengisi tangki pemberatnya dengan air.



Gambar 2. 1 Rencana umum pada wahana bawah air konvensional  
(sumber: Rawson, K.J. and Tupper, E.C., 2001)

##### 2.1.2 Jenis Jenis Wahana Bawah Air

Berdasarkan ukurannya wahana bawah air dibagi atas tiga jenis utama yaitu:

###### a. Large Submarine

Yaitu wahana bawah air dengan bobot lebih dari 2000 ton saat kondisi submerged. Beberapa contoh adalah Kilo-Class dan Thypoon-Class buatan Rusia. Beberapa jenis Large Submarine menggunakan tenaga penggerak berupa rektor nuklir.

#### b. Medium Submarine

Yaitu wahana bawah air dengan bobot saat menyelam berada pada kisaran nilai antara lebih dari 600 sampai dengan kurang dari 2000 ton. Salah satu contoh adalah KRI Cakra 401 milik TNI-AL yang merupakan class U-209 buatan Jerman.

#### c. Midget Submarine

Secara umum wahana bawah air ini didefinisikan sebagai dengan bobot dibawah 150 ton. Namun, beberapa jenis midget submarine juga memiliki bobot hingga lebih dari 300 ton.

Berdasarkan tenaga penggerak (propulsi), umumnya dibagi menjadi 2 macam yaitu:

##### a. Wahana bawah air Diesel Elektrik

Wahana bawah air bertenaga mesin diesel dan motor listrik. Mesin diesel dihidupkan jika wahana bawah air berada dipermukaan air sebagai penggerak baling baling dan untuk mengisi baterai sebagai sumber listrik menghidupkan motor listrik untuk memutar baling-baling pada saat menyelam.

##### b. Wahana bawah air Nuklir

Wahana bawah air yang menggunakan reaktor air bertekanan atau PWR (pressurizer water reactor) sebagai sumber tenaga memutar turbin utama yang menggerakkan baling-baling serta motor elektrik pengisi baterai yang menghasilkan listrik untuk berbagai keperluan.

### 2.1.3 Kecepatan Jelajah Wahana Bawah Air

Pada umumnya, kecepatan jelajah wahana bawah air dibagi menjadi 3 jenis yaitu:

#### a. Kecepatan *Silent Run*

Kecepatan pada *silent run* bertujuan untuk menghindari pelacakan oleh sonar. Biasanya digunakan untuk menyusup ke daerah lawan. Kecepatan silent run berkisar sangat kecil, untuk mengurangi getaran yang dihasilkan dari sistem propulsi tersebut.

#### b. Kecepatan Jelajah (*Sailing run*)

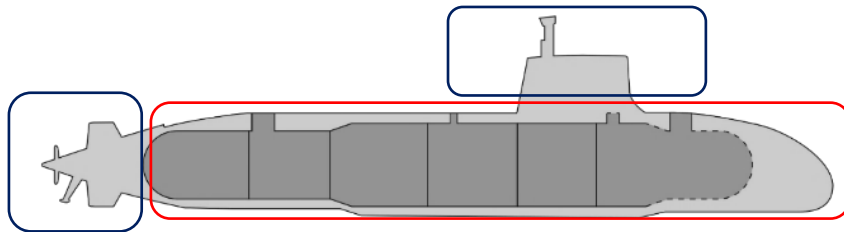
Kecepatan jelajah adalah kecepatan wahana bawah air pada kondisi biasanya atau berlayar. Kecepatan ini lebih besar dari kecepatan silent run namun lebih kecil dari kecepatan dalam pengejaran.

#### c. Kecepatan Patroli/Pengejaran

Kecepatan dalam pengejaran/patroli adalah kecepatan wahana bawah air yang digunakan untuk mengejar sesuatu objek. Kecepatan ini adalah kecepatan terbesar yang dimiliki wahana bawah air.

### 2.1.4 Perhitungan Tahanan pada Wahana Bawah Air

Menurut buku *Submersible Vehicle System Design*, tahanan pada wahana bawah air terdiri dari dua, yaitu *bare hull* dan *appendages resistance*. Berdasarkan gambar 2.2 dibawah, lingkaran merah merupakan *bare hull resistance* dan lingkaran biru merupakan *appendages resistance*.



Gambar 2. 2 Ilustrasi tahanan pada wahana bawah air  
(sumber: Burcher & Rydill, 1994)

Berdasarkan buku *Submersible Vehicle System Design*, perhitungan tahanan pada wahana bawah air adalah sebagai berikut:

$$R_T = R_{BH} + R_{APP}$$

- $R_{BH} = \text{Bare hull resistance}$

$$R_{BH} = \frac{1}{2} \rho \times A \times V^2 \times C_t$$

dimana:

- $\rho$  : Mass density of the operating fluid (lb/ft<sup>3</sup>)
- $A$  : Reference area of the submersible (wetted area)(ft<sup>2</sup>)
- $V$  : Velocity of Submersible (ft/s)
- $C_t$  : Non dimensional drag coefficient  
:  $C_f + \Delta C_f + C_r + C_w$

- $R_{app} = \text{Resistance of appendages}$

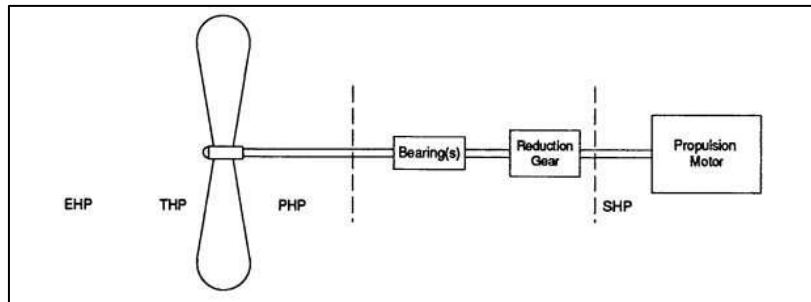
$$R_{app} = \frac{1}{2} \rho \times A \times V^2 \times C_t$$

dimana:

- $\rho$  : Mass density of the operating fluid (lb/ft<sup>3</sup>)
- $A$  : Reference area of appendages (wetted area)(ft<sup>2</sup>)
- $V$  : Velocity of Submersible (ft/s)
- $C_t$  : Drag coefficient for the appendages

### 2.1.5 Perhitungan Daya pada Wahana Bawah Air

Menurut buku *Submersible Vehicle System Design* daya wahana bawah air dapat diketahui melalui skema pada Gambar 2.3 dan rumus berikut:



Gambar 2. 3 Skema sistem propulsi elektrik  
(sumber: Allmendinger, 1990)

- *PC (Propulsive Coefficient)*

PC adalah nilai koefisien propulsi. Perhitungan koefisien propulsi (PC) menurut buku *Submersible Vehicle System Design* adalah sebagai berikut:

$$P_c = \eta_H \times \eta_R \times \eta_o \times \eta_m$$

dimana;

$\eta_H$  = Hull efficiency

$\eta_R$  = Relative rotative ef.

$\eta_o$  = Open water ef.

$\eta_m$  = Machinery efficiency

- *EHP (Effective Horsepower)*

Daya Efektif atau EHP adalah daya yang diperlukan untuk menggerakkan wahana bawah air atau untuk menarik wahana bawah air dengan kecepatan v. Perhitungan daya efektif (EHP) menurut buku *Submersible Vehicle System Design* adalah sebagai berikut:

$$EHP = R_T \times V \text{ (kW)}$$

Dimana  $R_T$  = Tahanan total wahana bawah air (kN)

$V$  = Kecepatan wahana bawah air (knot)

- THP (*Thrust Horsepower*)

*Propulsive Horse Power* (PHP) adalah daya yang dihasilkan oleh baling baling (lihat gambar 2.3). Perhitungan *Thrust Horsepower* (THP) menurut buku *Submersible Vehicle System Design* adalah sebagai berikut:

$$THP = \frac{(1 - w)}{(l - t)} EHP \text{ (kW)}$$

Dimana  $\frac{(1-w)}{(l-t)}$  = *Hull Efficiency*  
 EHP = *Effective Horse Power* (kW)

- PHP (*Propulsive Horsepower*)

*Propulsive Horse Power* (PHP) adalah daya yang diteruskan hingga ke baling baling (lihat gambar 2.3). Perhitungan *Propulsive Horsepower* (PHP) menurut buku *Submersible Vehicle System Design* adalah sebagai berikut:

$$PHP = \eta_m \times SHP = 2\pi \times n \times Q \text{ (kW)}$$

Dimana  $\eta_m$  = *Machinery Efficiency*  
 SHP = *Shaft Horse Power* (kW)  
 n = Putaran (rps)  
 Q = Torsi (kNm)

- SHP (*Shaft Horse Horsepower*)

*Shaft Horse Power* (SHP) adalah daya yang terukur hingga daerah di depan bantalan tabung poros (*stern tube*) dari sistem perporosan penggerak wahana bawah air. Perhitungan *Shaft Horsepower* (PHP) menurut buku *Submersible Vehicle System Design* adalah sebagai berikut:

$$SHP = EHP / P_c \text{ (kW)}$$

Dimana  $P_c$  = Koefisien Propulsi  
 EHP = *Effective Horse Power* (kW)

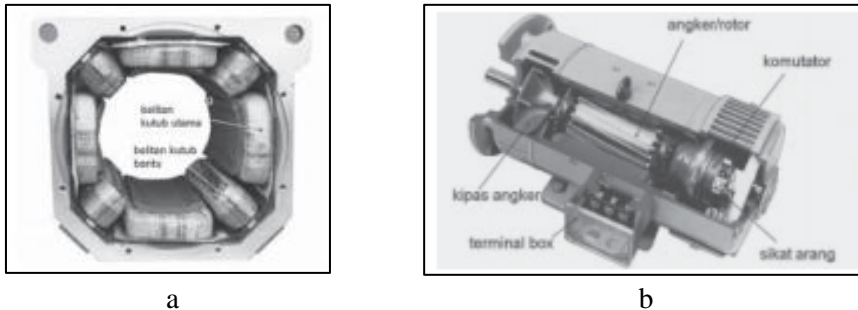
## 2.2 Motor Listrik Arus Searah

### 2.2.1 Mesin Arus Searah

Mesin arus searah dapat berupa generator DC atau motor DC. Untuk membedakan sebagai generator atau motor dari mesin difungsikan sebagai apa. Generator DC adalah alat yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik DC. Motor DC adalah alat yang mengubah energi listrik DC menjadi energi mekanik putaran. Sebuah motor DC dapat difungsikan sebagai generator atau sebaliknya generator DC bisa difungsikan sebagai motor DC.

Secara fisik mesin DC tampak jelas ketika rumah motor atau disebut stator dibongkar terdapat kutub kutub magnet bentuknya menonjol gambar 2.4(a). Mesin DC yang sudah dipotong akan tampak beberapa komponen yang mudah dikenali. Bagian yang

berputar dan berbentuk belitan kawat dan ditopang poros disebut sebagai rotor atau jangkar gambar 2.4(b).



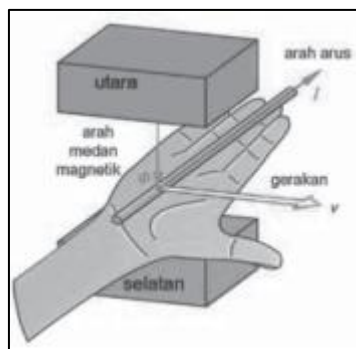
Gambar 2. 4 (a) Stator mesin DC dan medan magnet (b) Fisik Mesin DC  
(sumber: <https://www.slideshare.net/ekostereo/03-bab-06-motor-listrik-dc>)

Mesin DC dapat difungsikan sebagai generator DC maupun sebagai motor DC. Saat sebagai generator DC fungsinya mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, sedangkan sebagai motor DC mengubah energi listrik menjadi energi mekanik.

## 2.3 Generator DC

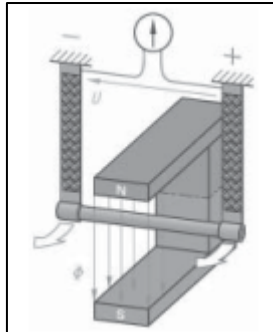
### 2.3.1 Prinsip Kerja Generator DC

Prinsip pembangkitan listrik mengikuti kaidah tangan kanan Flemming. Sepasang magnet permanen menghasilkan garis medan magnet  $\phi$ , kawat penghantar di atas telapak tangan kanan ditembus garis medan magnet  $\phi$ . Jika kawat digerakkan ke arah ibu jari, maka dalam kawat dihasilkan arus listrik  $I$  yang searah dengan keempat arah jari tangan.



Gambar 2. 5 Kaidah Tangan Kanan Flemming  
(sumber: <https://www.slideshare.net/ekostereo/03-bab-06-motor-listrik-dc>)

Percobaan secara sederhana dapat dilakukan dengan menggunakan sepasang magnet permanen berbentuk U, sebatang kawat digantung dikedua sisi ujungnya, pada ujung kawat dipasangkan voltmeter (Gambar 2.6).



Gambar 2. 6 Model prinsip kerja generator DC

(sumber: <https://www.slideshare.net/ekostereo/03-bab-06-motor-listrik-dc>)

Batang kawat digerakkan ke arah panah, pada kawat dihasilkan ggl induksi dengan tegangan yang terukur pada voltmeter.

Besarnya ggl induksi yang dibangkitkan:  $V_i = B \times L \times v \times z$  Volt

$V_i$  = Tegangan induksi pada kawat, Volt

$B$  = Kerapatan medan magnet, Tesla

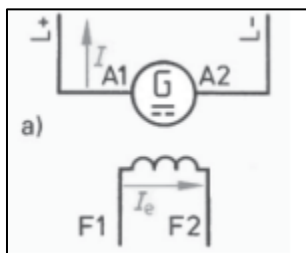
$L$  = Panjang kawat efektif, meter

$v$  = Kecepatan gerak, m/detik

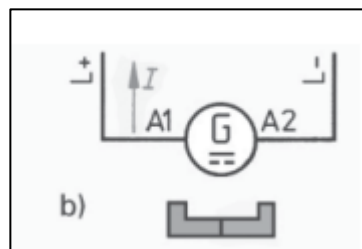
$z$  = Jumlah belitan kawat

### 2.3.2 Generator Penguat Terpisah

Jenis generator penguat terpisah ada dua jenis 1) penguat elektromagnetik (gambar 2.7a) dan 2) magnet permanen (gambar 2.7 b). Penguat elektromagnetik melalui belitan F1-F2 diberi sumber listrik DC dari luar misalnya dengan baterai, dengan mengatur arus eksitasi  $I_e$ , maka tegangan terminal rotor A1-A2 dapat dikendalikan. Generator penguat terpisah dipakai dalam pemakaian khusus.



a

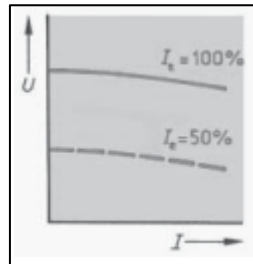


b

Gambar 2. 7 (a) Rangkaian Generator DC Penguat terpisah (b) Rangkaian Generator DC Penguat magnet permanen

(sumber: <https://www.slideshare.net/ekostereo/03-bab-06-motor-listrik-dc>)

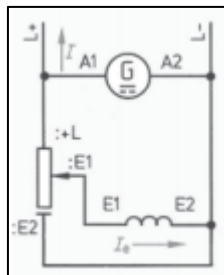
Penguat dengan magnet permanen tegangan keluaran generator terminal rotor A1-A2 konstan. Karakteristik tegangan  $U$  relative konstan dan tegangan akan menurun sedikit ketika arus beban  $I$  dinaikkan mendekati harga nominalnya (gambar 2.8)



Gambar 2. 8 Karakteristik tegangan generator penguat terpisah  
(sumber: <https://www.slideshare.net/ekostereo/03-bab-06-motor-listrik-dc>)

### 2.3.3 Generator Belitan Shunt

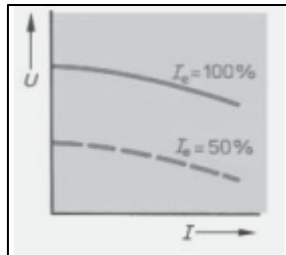
Generator belitan shunt E1-E2 dipasangkan secara parallel dengan belitan rotor A1-A2 (gambar 2.9). Tegangan awal generator diperoleh dari magnet sisa yang terdapat pada medan magnet stator. Rotor berputar dalam medan magnet yang lemah, dihasilkan tegangan yang akan memperkuat medan magnet stator, sampai dicapai tegangan nominalnya.



Gambar 2. 9 Rangkaian generator belitan shunt  
(sumber: <https://www.slideshare.net/ekostereo/03-bab-06-motor-listrik-dc>)

Pengukuran arus eksitasi yang melewati belitan shunt E1-E2 diatur oleh tahanan geser. Makin besar arus eksitasi shunt makin besar medan magnet penguat shunt dan tegangan terminal meningkat sampai pada tegangan nominalnya. Karakteristik tegangan  $U$  terhadap peningkatan arus relative stabil, tegangan akan cenderung menurun ketika arus  $I$  mendekati harga nominalnya (gambar 2.10)

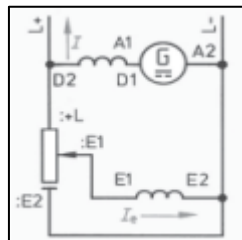




Gambar 2. 10 Karakteristik tegangan generator shunt  
(sumber: <https://www.slideshare.net/ekostereo/03-bab-06-motor-listrik-dc>)

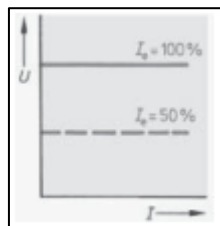
### 2.3.4 Generator Belitan *Kompound*

Generator belitan compound disamping memiliki blitan rotor A1-A2, memiliki dua penguat magnet yaitu medan seri notasi D1-D2 dan belitan penguat magnet shunt notasi E1-E2 (gambar 2.11). Belitan seri D1-D2 disambungkan seri dengan rangkaian rotor A1-A2, sehingga arus ke beban sekaligus sebagai penguat seri. Belitan shunt E1-E2 disambungkan parallel penguat seri. Belitan shunt E1-E2 disambungkan parallel dengan rangkaian belitan rotor. Arus eksitasi magnet shunt  $I_e$  diperoleh dengan mengatur tahanan geser.



Gambar 2. 11 Rangkaian generator compound  
(sumber: <https://www.slideshare.net/ekostereo/03-bab-06-motor-listrik-dc>)

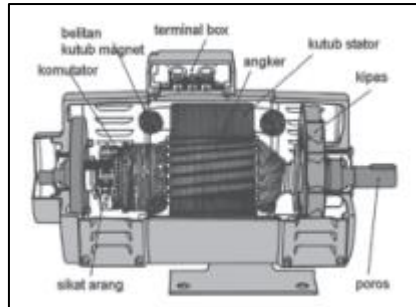
Generator penguat compound adalah kombinasi terbaik generator penguat shunt dan generator penguat seri. Karakteristik tegangan sebagai fungsi arus beban menghasilkan tegangan terminal yang konstan meskipun arus beban  $I$  mencapai nilai nominalnya (gambar 2.12).



Gambar 2. 12 Karakteristik tegangan generator *Kompound*  
(sumber: <https://www.slideshare.net/ekostereo/03-bab-06-motor-listrik-dc>)

### 2.3.5 Kontruksi Generator DC

Potongan melintang memperlihatkan kontruksi generator DC (gambar 2.13). Generator DC terdiri dari dua bagian, yaitu stator bagian mesin DC yang diam, dan bagian rotor bagian mesin DC yang berputar.



Gambar 2. 13 Bentuk fisik generator DC

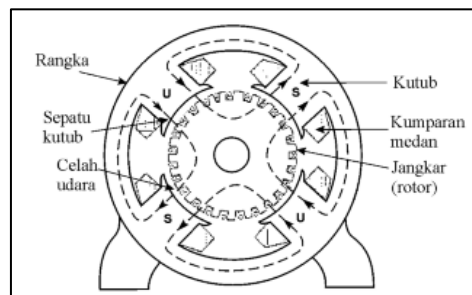
(sumber: <https://www.slideshare.net/ekostereo/03-bab-06-motor-listrik-dc>)

Bagian stator terdiri atas: rangka motor, belitan stator, sikar arang, bearing, dan terminal box. Bagian rotor terdiri: komutator, belitan rotor, kipas rotor dan poros rotor.

## 2.4 Motor DC

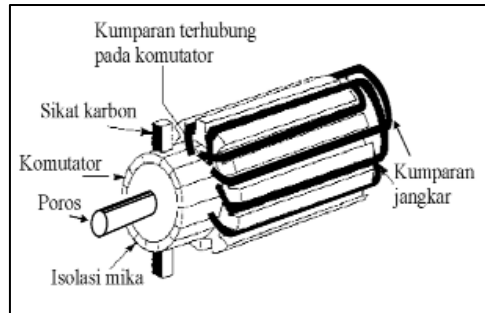
### 2.4.1 Pengertian

Motor DC memerlukan suplai tegangan pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi mekanik. Dalam motor DC terdapat dua kumparan yaitu kumparan medan yang berfungsi untuk menghasilkan medan magnet dan kumparan jangkar yang berfungsi sebagai tempat terbentuknya gaya gerak listrik (ggl E). jika arus dalam kumparan jangkar berinteraksi dengan medan magnet, akan timbul torsi (T) yang akan memutar motor. (Gottlieb, Irving, "Practical Electric Motor Handbook". Great Britain: Biddles Ltd., 1997)



Gambar 2. 14 Konstruksi motor arus searah bagian stator

(sumber: <http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/30893/3/Chapter%20II.pdf>)



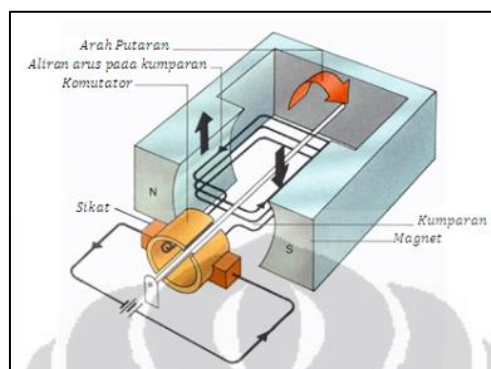
Gambar 2. 15 Konstruksi motor arus searah bagian rotor

(sumber: <http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/30893/3/Chapter%20II.pdf>)

### 2.4.2 Prinsip Kerja

Gerak atau putaran yang dihasilkan oleh motor arus searah diperoleh dari interaksi dua buah medan yang dihasilkan oleh bagian jangkar (armature) dan bagian medan (field) dari motor arus searah. Pada gambar dibawah, bagian medan berbentuk suatu kumparan yang terhubung ke sumber arus searah. Sedangkan bagian jangkar ditunjukkan sebagai magnet permanen (U-S), bagian jangkar ini tidak harus berbentuk magnet permanen, bisa juga berbentuk belitan yang akan menjadi elektro-magnet apabila mendapatkan sumber arus searah.

Sehingga apabila motor arus searah berjenis jangkar belitan, maka kita harus menyediakan dua sumber arus searah, satu untuk bagian jangkar, satu lagi untuk bagian medan. Bagian lain yang tidak kalah penting pada motor arus searah adalah adanya komutator yang berpasangan dengan cincin belah (slip rings). Pasangan ini menjadikannya suatu konverter mekanik yang membuat arus dari sumber mengalir pada arah yang tetap walaupun belitan medan berputar.



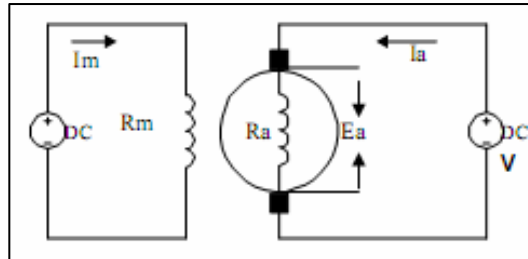
Gambar 2. 16 Prinsip Kerja Motor DC

(sumber: <http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/electrivity/generator/index.html>)

### 2.4.3 Jenis Jenis Motor DC

#### 1. Motor DC penguat terpisah / *Separately Excited*

Motor DC yang menggunakan arus penguat magnet ( $I_f$ ) yang diperoleh dari sumber arus searah di luar motor.



Gambar 2. 17 Rangkaian Motor DC Penguat Terpisah  
(sumber: M.Chasan Qodari, *Motor DC Dan Generator DC*, 2009)

Persamaan arus:

$$I_a = I$$

$$I_m = E / R_m$$

Persamaan tegangan:

$$V = E_a + I_a.R_a + 2r_e$$

$V$  = Tegangan jepit (volt)

$E_a$  = GGL lawan (volt)

$I_a$  = Arus jangkar (ampere)

$R_a$  = Tahanan lilitan jangkar (ohm)

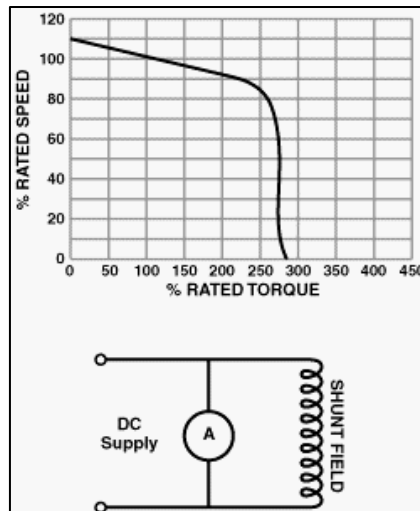
$I_m$  = Arus penguat terpisah (ampere)

$R_m$  = Tahanan penguat terpisah (ohm)

$e$  = Kerugian tegangan pada sikat-sikat

#### 2. Motor DC penguat sendiri / *Self Excited*: Motor Shunt

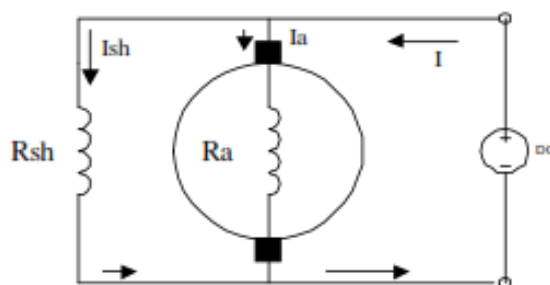
Motor DC yang menggunakan arus penguat magnet berasal dari motor DC itu sendiri. Pada motor shunt, lilitan penguat magnet disambungkan secara paralel dengan lilitan jangkar (A) seperti diperlihatkan dalam gambar 2.18. Oleh karena itu total arus dalam jalur merupakan penjumlahan arus medan dan arus jangkar.



Gambar 2. 18 Karakteristik Motor DC Shunt  
(sumber: Rodwell International Corporation, 1999)

Berikut tentang kecepatan motor *shunt* (E.T.E., 1997):

- Kecepatan pada prakteknya konstan tidak tergantung pada beban (hingga *torque* tertentu setelah kecepatannya berkurang, lihat Gambar 2.18) dan oleh karena itu cocok untuk penggunaan komersial dengan beban awal yang rendah, seperti peralatan mesin.
- Kecepatan dapat dikendalikan dengan cara memasang tahanan dalam susunan seri dengan dinamo (untuk kecepatan berkurang) atau dengan memasang tahanan pada arus medan (untuk kecepatan bertambah).



Gambar 2. 19 Rangkaian Listrik Motor DC Shunt  
(sumber: M.Chasan Qodari, Motor DC Dan Generator DC, 2009)

Persamaan arus:

$$I = I_a + I_{sh}$$

$$I_{sh} = V/R_{sh}$$

### Persamaan Tegangan

$$V = E_a + I_a.R_a + 27 e$$

$$V = I_{sh} \times R_{sh}$$

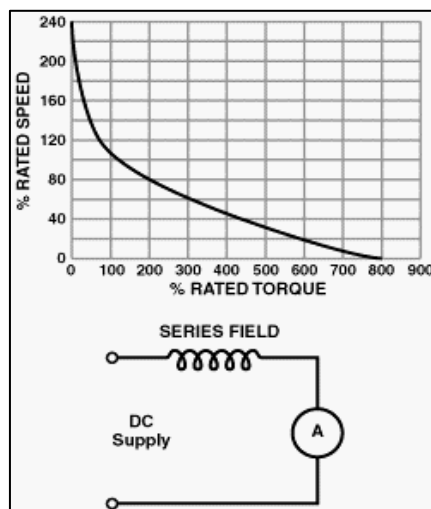
Dimana:

$R_{sh}$  = Tahanan penguat shunt

$I_{sh}$  = Arus penguat shunt

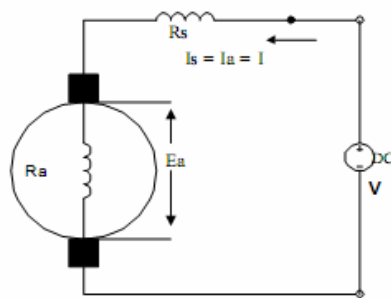
### 3. Motor DC penguat sendiri / *Self Excited*: Motor Seri

Motor DC penguat sendiri yang menggunakan lilitan penguat magnet dihubungkan seri dengan lilitan jangkar. Oleh karena itu nilai arus medan sama dengan arus jangkar.



Gambar 2. 20 Karakteristik Motor DC Seri  
(sumber: Rodwell International Corporation, 1999)

Motor seri DC ini cocok untuk penggunaan yang memerlukan Torsi awal yang tinggi, seperti derek dan alat pengangkat (lihat Gambar 2.20).



Gambar 2. 21 Rangkaian Listrik Motor DC Seri  
(sumber: M.Chasan Qodari, *Motor DC Dan Generator DC*, 2009)

Persamaan arus:

$$I = I_a = I_s$$

Persamaan tegangan:

$$V = E_a + I_a.R_a + I_s.R_s + 27e$$

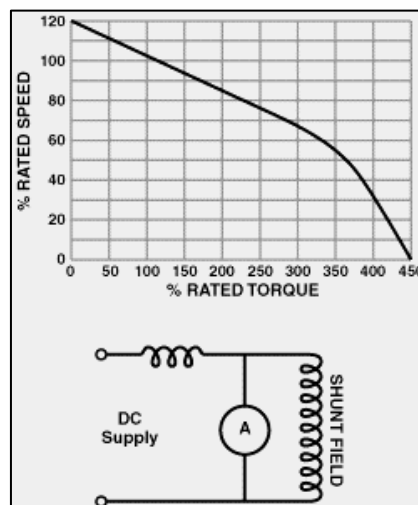
Dimana:

$I_s$  = Arus penguat seri yang besarnya sama dengan arus sumber.

$R_s$  = Tahanan lilitan penguat seri.

#### 4. Motor DC Kompon/Gabungan

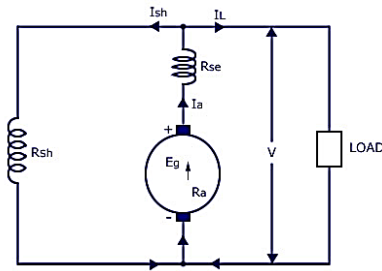
Pada motor kompon, lilitan penguat magnet dihubungkan secara paralel dan seri dengan lilitan jangkar. Sehingga, motor kompon memiliki torque penyalaan awal yang bagus dan kecepatan yang stabil. Makin tinggi persentase penggabungan (yakni persentase gulungan medan yang dihubungkan secara seri), makin tinggi pula torsi penyalaan awal yang dapat ditangani oleh motor ini.



Gambar 2. 22 Karakteristik Motor Kompon DC  
(sumber: Rodwell International Corporation, 1999)

#### 4.1 Motor DC Kompon Panjang

Kumparan penguat medan tambahan diletakkan secara seri antara kumparan jangkar dan kumparan penguat medan pada motor DC shunt.

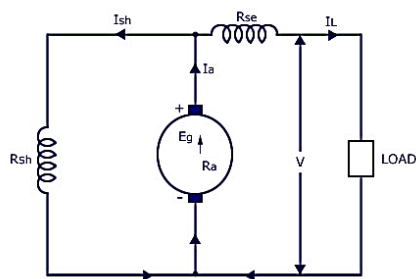


Gambar 2. 23 Rangkaian Motor DC Kompon Panjang

$$\begin{aligned}
 I_L &= I_{sh} + I_a \\
 I_a &= I_s \\
 V_{sh} &= I_{sh}.R_{sh} \\
 V_{sh} &= V_t \\
 V_s &= I_s.R_s = I_a.R_s \\
 V_t &= E_a + I_a.R_a + V_s \\
 V_t &= E_a + I_a.R_a + I_a.R_s \\
 E_a &= C.n.\phi
 \end{aligned}$$

#### 4.2 Motor DC Kompon Pendek

Dimana tata letak kumparan penguat medan tambahan diletakkan seri dengan kumparan medan pada motor DC shunt.



Gambar 2. 24 Rangkaian Motor DC Kompon Pendek

$$\begin{aligned}
 I_L &= I_{sh} + I_a \\
 I_L &= I_s \\
 V_{sh} &= I_{sh}.R_{sh} \\
 V_s &= I_s.R_s = I_L.R_s \\
 V_{sh} &= E_a + I_a.R_a
 \end{aligned}$$



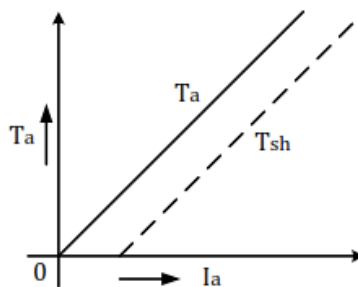
$$\begin{aligned}
 E_a &= C.n.\phi \\
 V_t &= V_{sh} + V_s \\
 V_t &= I_s.R_s + E_a + I_a.R_a
 \end{aligned}$$

#### 2.4.4 Karakteristik Motor DC

Kinerja dari motor DC dapat ditentukan berdasarkan kurva karakteristiknya yang disebut karakteristik. Berikut adalah tiga karakteristik penting pada motor DC:

##### 1. Karakteristik torsi dan arus jangkar ( $T_a/I_a$ )

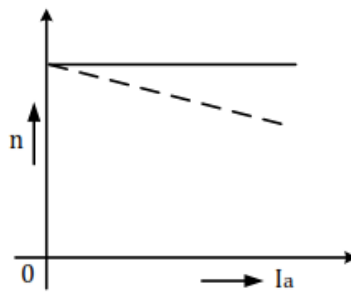
Asumsikan  $\phi$  bernilai konstan maka kita mengetahui nilai  $T_a$  sebanding nilai  $I_a$ , maka besar torsi akan bertambah secara linear dengan bertambahnya  $I_a$ . Untuk lebih jelasnya, bentuk kurva karakteristik torsi – arus jangkar dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2. 25 Kurva karakteristik torsi – arus jangkar ( $T_a/I_a$ )

##### 2. Karakteristik putaran dan arus jangkar ( $n/I_a$ )

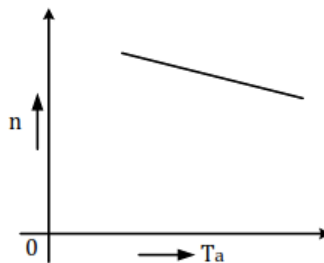
Jika kita anggap  $\phi$  bernilai konstan maka  $n$  sebanding  $E_a$ . Fluksi  $\phi$  dan ggl lawan  $E_a$  di dalam motor DC shunt akan berkurang dengan penambahan beban. Bagaimanapun juga  $E_a$  akan berkurang lebih banyak daripada  $\phi$  secara keseluruhan, ada beberapa pengurangan kecepatan. Drop bervariasi dari 5 sampai 15% kecepatan beban penuh, tergantung saturasi, reaksi jangkar dan posisi sikat. Oleh karena itu, kurva kecepatan akan berkurang ditunjukkan oleh garis putus putus. Tetapi secara umum motor shunt memiliki kecepatan putaran yang konstan. Untuk lebih jelasnya bentuk kurva putaran – arus jangkar dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2. 26 Kurva karakteristik putaran – arus jangkar ( $n/I_a$ )

### 3. Karakteristik putaran dan torsi ( $n/T_a$ )

Karakteristik putaran – torsi diperoleh dengan menggambarkan nilai  $n$  dan  $T_a$  untuk berbagai arus jangkar ( $I_a$ ). Dari kurva dapat dilihat bahwa kecepatan sedikit menurun seiring dengan pertambahan beban. Untuk lebih jelasnya karakteristik putaran – torsi dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 2. 27 Kurva karakteristik putaran – torsi ( $n/T_a$ )

## 2.4.5 Pengaturan Putaran Motor DC

Telah diketahui bahwa untuk motor arus searah dapat diturunkan rumus sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 V_t &= E_a + I_a.R_a \\
 E_a &= C.n.\phi \\
 E_a &= V_t - I_a.R_a \\
 C.n.\phi &= V_t - I_a.R_a \\
 n &= \frac{V_t - I_a.R_a}{C.\phi}
 \end{aligned}$$

Dimana:

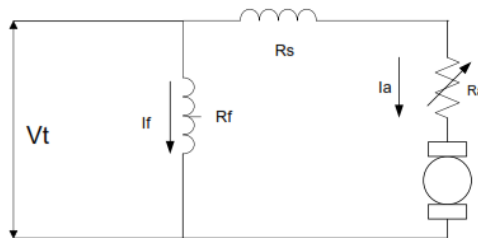
- $n$  = jumlah putaran
- $C$  = konstanta (bergantung pada ukuran fisik motor)
- $V_t$  = tegangan terminal
- $R_a$  = tahanan jangkar
- $I_a$  = arus jangkar
- $\phi$  = fluks magnetic

Dengan persamaan diatas, dapat dilihat bahwa putaran motor DC dapat diatur dengan cara merubah:

- 1) Arus jangkar ( $I_a$ )
- 2) Fluks magnetik ( $\phi$ )
- 3) Tegangan terminal ( $V_t$ )

#### 1. Pengaturan Arus Jangkar ( $I_a$ )

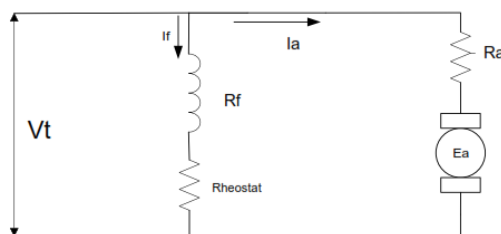
Arus rangkaian jangkar motor dapat diubah dengan menambahkan tahanan variable yang dihubungkan seri dengan jangkar. Bila tahanan seri dinaikan, arus pada jangkar motor berkurang dan kecepatan motor turun. Sama halnya, kecepatan motor akan bertambah jika tahanan seri dikurangi. Pengaturan dengan menambah tahanan seri pada jangkar dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2. 28 Rangkaian ekivalen pengaturan kecepatan dengan menambah tahanan seri pada jangkar

#### 2. Pengaturan Fluks magnetik ( $\phi$ )

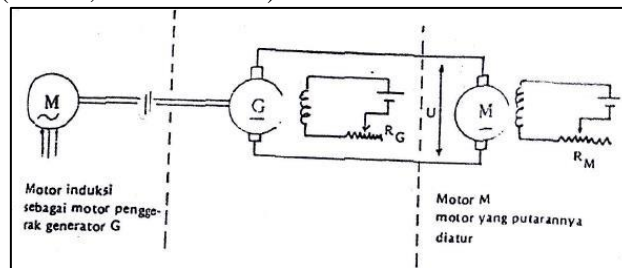
Kecepatan putar motor dc akan minimum jika arus  $i_f$  minimum dan ini akan terjadi pada posisi rheostat maksimum. Jika kita menaikkan fluks medan maka kecepatan motor akan bertambah, dan sebaliknya jika kita menurunkan fluks medan maka kecepatan motor akan berkurang. Pengaturan dengan menambah tahanan seri pada jangkar dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2. 29 Rangkaian ekivalen pengaturan kecepatan dengan rheostat dalam mengontrol fluksi

### 3. Pengaturan Tegangan (*Ward Leonard System*)

Beberapa penggunaan motor DC memerlukan daerah pengendalian kecepatan yang luas dan tahapan yang halus. Sistem Ward Leonard atau sistem pengaturan tegangan, memberikan pengendalian yang demikian dan melibatkan generator lain untuk menggerakkan motor yang kecepatannya dapat diatur. Secara umum susunan sistem ward leonard adalah sebagai berikut; motor DC sebagai penggerak generator, generator, dan motor DC (kecepatannya yang dapat diatur) dan beban. (Morris, Noel M. 1983)



Gambar 2. 30 Rangkaian Ekuivalen Pengaturan Kecepatan dengan Metode Ward Leonard.  
(Morris, Noel M. 1983)

Pengaturan putaran Ward Leonard dilakukan dengan mengubah tegangan jepit (U) yang dimana fluks magnet motor konstan. Penggerak mula yang biasanya motor induksi berkecepatan konstan dipergunakan untuk menggerakkan generator (G). Perubahan tahanan medan generator G (R<sub>G</sub>) akan merubah tegangan jepit U yang diberikan kepada motor DC (M) yang diatur putarannya. Untuk mengatur putaran motor M dilakukan dengan mengubah tegangan jepit U. Untuk itu dilakukan dengan mengatur tahanan medan (R<sub>G</sub>) pada belitan generator DC. Kecepatan motor dapat diatur pada setiap kecepatan antara nol dan kecepatan maksimumnya dengan mengatur eksitasi medan generator G pada harga yang dikehendaki.

Berdasarkan penjelasan diatas, pengaturan putaran motor DC dengan metode Ward-Leonard antara lain:

- Input atau masukan dari generator memiliki kecepatan yang konstan, yang disuplai oleh motor induksi.
- Tegangan output dari generator DC ialah tegangan input pada motor DC sehingga dapat diatur.
- Kegunaan dari *variabel resistance* pada generator DC ialah sebagai pengendali atau pengatur tegangan output dari generator DC.

#### 2.4.6 Daya Output Motor DC

Daya yang dihasilkan pada motor dapat dihitung melalui rumus berikut:

$$P = E_a \times I_a = T \times \omega$$

$E_a$  merupakan nilai tegangan (V)

$I_a$  merupakan nilai arus jangkar (A)

P merupakan nilai daya motor (W)

T merupakan nilai torsi motor (Nm)

$\omega$  merupakan nilai *angular speed* (rad/s)

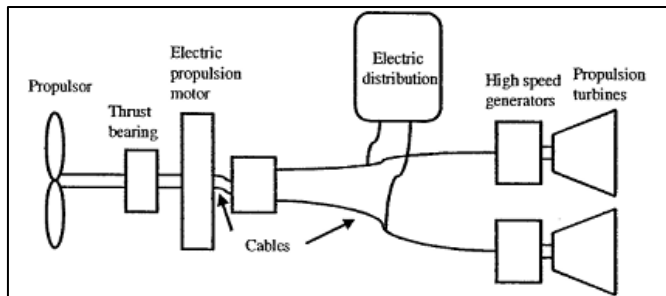
### 2.5 Sistem Propulsi Elektrik

Salah satu pengganti mesin penggerak utama pada kapal adalah digunakannya motor DC. Hal ini dianggap baik dan menguntungkan. Motor DC memiliki beberapa kelebihan antara lain; tahan terhadap getaran, memiliki umur panjang, kemampuan beban lebih dan efisiensi tinggi jika dibandingkan dengan motor AC. Pengaturan kecepatan motor DC akan sangat mudah dilakukan dengan berkembangnya teknologi semikonduktor dan bidang elektronika daya. Suatu hal yang wajar jika motor DC sering digunakan dibandingkan motor AC dalam penggunaan mesin penggerak utama.

Penggunaan motor listrik DC sebagai tenaga penggerak utama kapal, biasanya digunakan pada kapal dengan kemampuan manuver yang tinggi, kapal khusus, dan kapal dengan daya tampung muatan yang besar, salah satu contohnya adalah kapal selam. Perkembangan penggerak utama pada kapal mengalami perkembangan yang sangat pesat sejak ditemukannya mesin uap, mesin diesel serta turbin gas. Namun dalam hal pengaturan putaran dan membalikkan putaran, ketiga prime mover tersebut sangat sulit dilakukan, bahkan untuk membalikkan putaran pada turbin uap dan gas sangatlah tidak mungkin dilakukan.

Berdasarkan pada fakta diatas maka dikembangkanlah sistem yang merupakan gabungan dari ketiga prime mover tersebut dengan motor listrik yang selanjutnya disebut dengan *Electric Propulsion*. Pada sistem *electric propulsion*, ketiga prime mover menggerakkan generator dan selanjutnya generator mensuplai listrik yang digunakan untuk memutar motor listrik. Jenis motor listrik yang digunakan disesuaikan dengan type atau fungsi kapal tersebut dalam eksplotasinya. Pada umumnya kapal menggunakan motor DC. (Harbour, Joel P, Evaluation and comparison of electric propulsion motors for submarines, 2001)

Sistem penggerak utama kapal yang menggunakan generator set sebagai mesin penggerak utama adalah sistem propulsi elektrik. Dalam hal ini generator dihubungkan ke switchboard, dan selanjutnya energi atau aliran listrik diteruskan ke motor elektrik yang akan menggerakkan baling-baling kapal.



Gambar 2. 31 Skema Electric Drive.

(Sumber: Harbour, Joel P, Evaluation and comparison of electric propulsion motors for submarines, 2001)

## 2.6 Peraturan Bureau Veritas untuk Sistem Propulsi Elektrik

Sistem propulsi elektrik minimal memiliki konfigurasi 1 *prime mover*, 1 generator dan 1 motor elektrik. Hal ini berdasarkan peraturan *Bureau Veritas* Tahun 2013 *Chapter 2 Section 14* tentang Sistem Propulsi Elektrik. Jika listrik yang digunakan untuk sistem propulsi tersebut bersifat independen maka mesin diesel yang menggerakkan generator elektrik akan dijadikan sebagai main engine. Ketika sistem propulsi didesain dengan 2 generator maka konfigurasi yang dimiliki prime movers akan dijadikan sebagai main propulsi yang medium. Untuk sistem propulsi elektrik dengan lebih dari 2 generator maka menggunakan *auxiliary* generator dan membutuhkan pengontrolan dan monitoring.

Menurut *Bureau Veritas* Tahun 2013 *Chapter 2 Section 14* antara lain;

Hal yang diperhatikan dalam pengontrolan sistem propulsi elektrik adalah:

1. Monitoring untuk alarm
2. Kecepatan atau *pitch* dari propeller

Instrumen yang diperlukan pada alternator propulsi adalah:

1. Ammeter untuk masing-masing phase
2. Voltmeter
3. Wattmeter
4. Tachometer atau Frekuensi meter
5. Var meter
6. Indikator temperatur

## 2.7 Software MATLAB

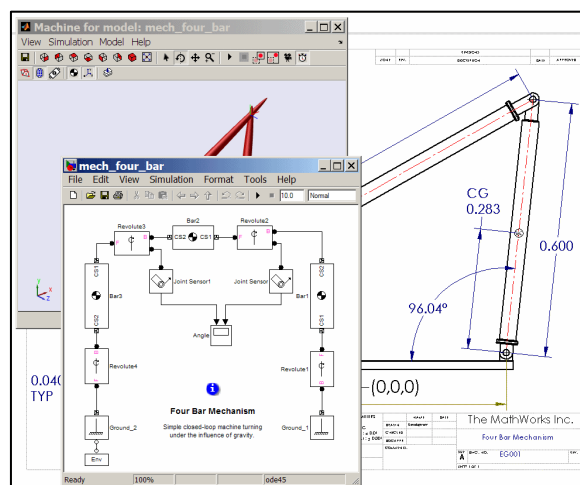
MATLAB adalah singkatan dari MATRIX LABORATORY, yang biasanya digunakan dalam:

- Pengembangan Algoritma matematika dan komputasi
- Pemodelan, simulasi, dan pembuatan prototype dari penerimaan data
- Analisa, eksplorasi, dan visualisasi data
- Scientific dan engineering
- Pengembangan aplikasi berbasis grafik dan pembuatan Graphical User Interface (GUI)

Software MATLAB memiliki pengaplikasian yang berbeda – beda khususnya dalam pengaplikasian yang membutuhkan perhitungan secara matematis. Penting untuk mengetahui bahwa matlab melakukan seluruh perhitungan matematis dalam bentuk matriks. Semua operasi matematika dalam MATLAB adalah operasi matriks. MATLAB dapat menunjukkan hasil perhitungan dalam bentuk grafik dan dapat dirancang sesuai keinginan kita menggunakan GUI yang kita buat sendiri.

## SIMULINK & SimMechanics

Simulink adalah platform didalam MATLAB yang digunakan untuk mensimulasikan sistem dinamik secara realtime. Didalam simulink terdapat berbagai macam toolbox yang dapat digunakan untuk merangkai sistem dinamik. Toolbox yang kami gunakan adalah toolbox SimMechanics. Toolbox ini berisi part-part yang digunakan untuk mensimulasikan sistem mekanik. Cara penggunaan SimMechanics adalah dengan menghubungkan-hubungkan block- block yang ada sesuai dengan desain mekanik yang diinginkan dan mensimulasikannya dengan parameter tertentu.



Gambar 2. 32 Contoh Penggunaan SimMechanics

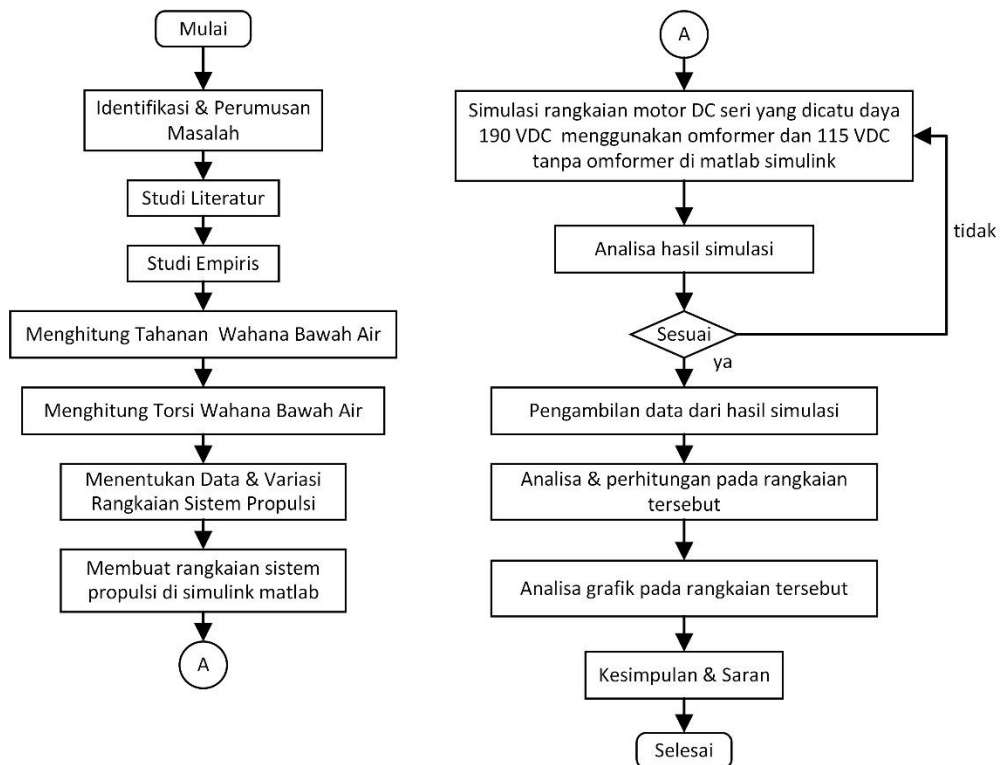
*Halaman ini sengaja dikosongkan*



### BAB III

#### METODOLOGI PENELITIAN

Proses pemecahan masalah pada skripsi ini dilaksanakan dengan menggunakan metode simulasi. Proses tersebut dapat dilihat pada *flow chart* dibawah ini.



Gambar 3. 1 Flow chart metodologi penelitian

#### 3.1 Studi Literatur

Studi literatur merupakan kegiatan mengumpulkan teori – teori dasar yang dapat mendukung proses simulasi. Studi literatur dimulai dengan mempelajari konsep dasar, karakteristik dan pengaturan dari motor DC. Dan juga mempelajari konsep dasar wahana bawah air, nilai tahanan serta sistem propulsi diesel elektrik pada wahana bawah air. Hasil dari studi literature ini nantinya akan digunakan sebagai acuan melakukan simulasi dan analisa.

### 3.2 Studi Empiris

Studi empiris merupakan studi lanjutan berdasarkan percobaan – percobaan yang telah ada dan dipublikasikan. Studi empiris ini terdiri dari data utama wahana bawah air, rangkaian sistem propulsi diesel elektrik dan baterai yang digunakan. Setelah data – data ini didapatkan maka dapat dilanjutkan proses pengolahan data.

### 3.3 Perhitungan Tahanan pada Wahana Bawah Air

Pengolahan data yang akan dilakukan adalah menghitung tahanan wahana bawah air. Hal ini sesuai referensi yang dijelaskan sebelumnya dan dilanjutkan dengan pemodelan. Selanjutnya menghitung *Wet surfaced area* wahana bawah air, setelah itu maka dapat dilanjutkan dengan mencari tahanan wahana bawah air menurut Burcher & Rydill.

### 3.4 Perhitungan Torsi pada Wahana Bawah Air

Setelah diketahui nilai tahanan wahana bawah air, maka dilanjutkan menghitung nilai torsi wahana bawah air berdasarkan referensi yang dijelaskan sebelumnya. Nilai torsi yang didapatkan akan menjadi nilai *input* pada simulasi rangkaian sistem propulsi tersebut.

### 3.5 Penentuan data & variasi rangkaian sistem propulsi

Data yang dikumpulkan terdiri dari data primer dan data sekunder.

- Data primer : Data yang diperoleh dari variasi rangkaian pada sistem propulsi elektrik pada penelitian sebelumnya.
- Data sekunder : Data yang diperoleh dari hasil simulasi dan variasi rangkaian yang telah dilakukan.

Data wahana bawah air yang digunakan adalah berdasarkan referensi.

Panjang keseluruhan	: 59,57 m
Diameter dalam	: 6,20 m
Tinggi sarat air	: 5,50 m
Tinggi suluruhnya	: 11,34 m
Displacement menyelam	: 1390 m <sup>3</sup>
Kedalaman menyelam	: 250 m
Kec. Waktu menyelam	: 21 knot
Jarak jelajah	: 22 NM

Data baling baling / propeller sebagai berikut :

Diameter	: 3,28 m
Putaran maks	: 200 rpm

Data motor listrik DC sebagai berikut :

Jumlah	: 1 buah
Type	: DC motor shunt 380 Volt DC
Daya	: 2 x 1850 kW pada 200 rpm

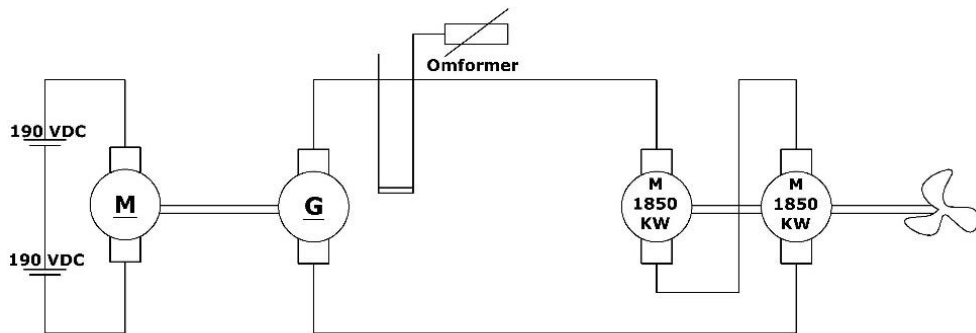
Konstruksi : dibuat dobel jangkar  
 Data generator DC sebagai berikut :

Daya : 480 kW pada 1500 rpm  
 Menghasilkan tegangan hingga 340 V

Data baterai sebagai berikut :

Jumlah : 480 cell, dibagi 4 group  
 Tegangan : 2 – 3 Volt / Cell  
 Kapasitas : 10260 AH  
 Dimensi : (1421 x 290 x 450) mm<sup>3</sup>  
 Berat : 525 ± 2 kg

### 3.5.1 Rangkaian seri motor DC menggunakan ohmformer

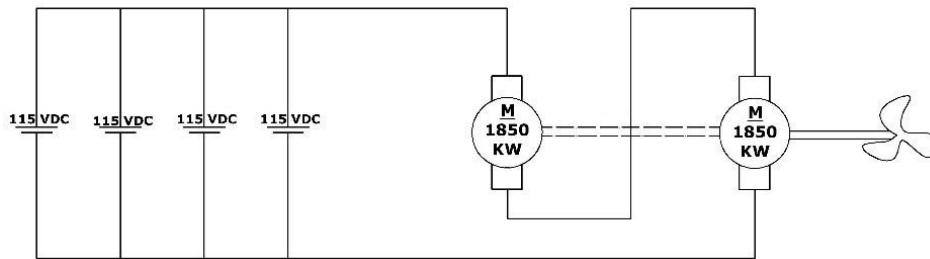


Gambar 3. 2 Gambar rangkaian I

Rangkaian seri motor DC menggunakan ohmformer yang selanjutnya disebut rangkaian I pada dasarnya menggunakan sistem *Ward Leonard*. Pada rangkaian *Ward Leonard*, digunakan motor penggerak utama berupa motor DC, generator DC dan motor DC yang dihubungkan ke beban. Motor DC penggerak utama menggerakkan generator. Tegangan induksi yang dihasilkan oleh generator DC digunakan sebagai masukan bagi lilitan jangkar untuk motor DC yang dihubungkan ke beban.

Tegangan *output* dari generator DC ialah tegangan *input* pada motor DC penggerak utama sehingga dapat diatur. Kegunaan dari ohmformer pada generator DC ialah sebagai pengendali atau pengatur tegangan *output* dari generator DC. Pengaturan tersebut bertujuan untuk mengatur kecepatan pada motor DC yang dihubungkan ke beban.

### 3.5.2 Rangkaian seri motor DC tanpa menggunakan ohmformer



Gambar 3. 3 Gambar rangkaian II

Rangkaian seri motor DC tanpa menggunakan ohmformer yang selanjutnya disebut rangkaian II pada dasarnya adalah rangkaian baterai yang disusun secara parallel yang digunakan sebagai sumber listrik motor DC yang disusun secara seri. Selanjutnya konstruksi motor DC dibuat double jangkar yang terhubung langsung dengan poros propeller.

### 3.6 Proses Simulasi

Proses simulasi dilakukan dengan menggunakan software MATLAB dengan rangkaian yang sudah ditentukan sebelumnya.

### 3.7 Analisa

Setelah proses simulasi maka dilakukan proses analisa. Analisa ini untuk mengetahui karakteristik tiap rangkaian yang digunakan antara putaran dan torsi yang dihasilkan. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk mengetahui efisiensi rangkaian tersebut sebagai sistem propulsi di wahana bawah air.

### 3.8 Kesimpulan dan Saran

Setelah dilakukan analisa pada setiap variasi rangkaian, maka dapat ditarik kesimpulan dan saran berdasarkan hasil yang didapat.

## BAB IV

### ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

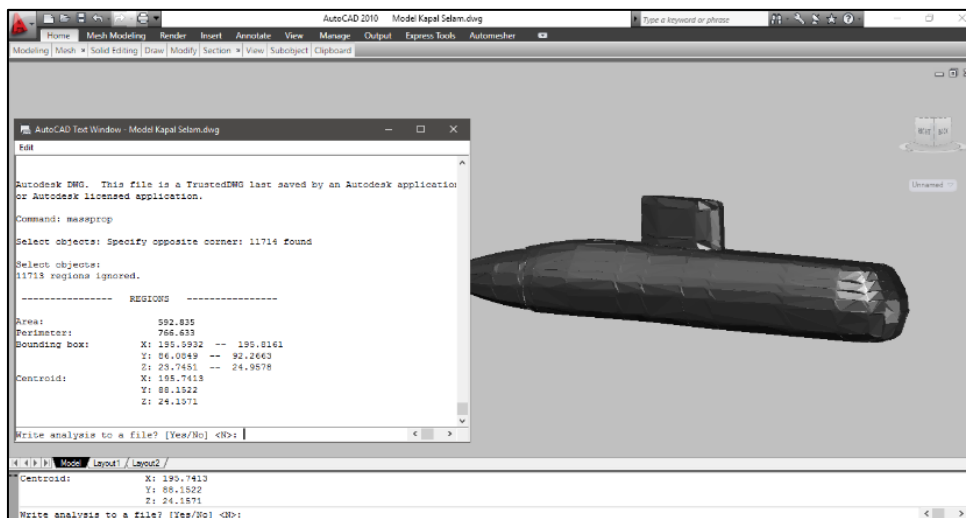
#### 4.1 Perhitungan Tahanan Wahana Bawah Air

Menurut buku *Submersible Vehicle System Design*, tahanan pada wahana bawah air terdiri dari dua, yaitu *bare hull* dan *appendages resistance*. *Bare hull resistance* merupakan tahanan badan / *body*, sedangkan *appendages resistance* merupakan tahanan tambahan pada badan wahana bawah air seperti *rudder top / bottom, plane top / bottom*, dan *fin*.

##### 4.1.1 Luasan Permukaan Basah

Sebelum menghitung tahanan, nilai yang harus diketahui terlebih dahulu adalah luasan permukaan basah / *reference area of the submersible (wetted area)* dari wahana bawah air tersebut. Luasan permukaan basah adalah luasan permukaan pada wahana bawah air yang tercelup dalam air. Pada kasus ini luasan permukaan basah wahana bawah air adalah seluruh luasan permukaan badan wahana bawah air tersebut.

Nilai tersebut dapat diketahui dengan memodelkan wahana bawah air tersebut dan selanjutnya luasan permukaan basah akan dapat diketahui.



Gambar 4. 1 Contoh model wahana bawah air

#### 4.1.2 Bare Hull Resistance

Nilai *bare hull resistance* didapatkan melalui rumus berikut:

$$R_{BH} = \frac{1}{2} \rho A V^2 C_t$$

- $R_{BH}$  : Bare hull resistance (N)
- $\rho$  : Mass density of the operating fluid  
: 1025 kg/m<sup>3</sup>  
: 63,989lb/ft<sup>3</sup>
- $A$  : Reference area of the submersible (wetted area)  
: 592.835 m<sup>2</sup>  
: 6381.235 ft<sup>2</sup>
- $V$  : Velocity of Submersible  
: 21 knot  
: 35,4 ft/s
- $C_t$  : Non Dimensional Drag Coefficient  
:  $C_f + \Delta C_f + C_r + C_w$   
: 0.001435118
- $C_f$  : Frictional resistance coefficient
  - $C_f = \frac{0.075}{(\log 10 Re - 2)^2}$
  - $Re = \frac{v \times L}{\nu}$
  - $C_f = 0.001435118$
- $\Delta C_f$  : Correlation Allowance ( 0.0004 - 0.0009)  
: 0.0005 (diambil)
- $C_r$  : Residual resistance coefficient  
: 0.00039 (tipe fleet submarine)
 

Hullform	$C_r = 10^{-3}$
Deep quest	0.677
DSRV	0.435
Fleet Sub	0.39
Albacore	0.1
- $C_w$  : Wave making resistance coefficient  
: 0 (fully submerged mode)

Tabel 4. 1 Tipe tipe nilai  $C_r$

Sehingga didapatkan nilai bare hull resistance sebesar 117200 N atau 117,2 kN.

#### 4.1.3 Appendages Resistance

Selanjutnya adalah menghitung appendages resistance, tahanan tambahan pada badan wahana bawah air seperti *rudder top / bottom, plane top / bottom, dan fin*.

$$R_{app} = \frac{1}{2} \rho AV^2 C_t$$

- $R_{app}$  : Appendages resistance (N)
- $\rho$  : Mass density of the operating fluid  
: 1025 kg/m<sup>3</sup>  
: 63,989 lb/ft<sup>3</sup>
- $A$  : Reference area of appendages (20-25% wetted area)  
: 148.208 m<sup>2</sup>  
: 1595.308 ft<sup>2</sup>
- $V$  : Velocity of Submersible  
: 21 knot  
: 35,4 ft/s
- $C_t$  : based on frontal area  

$$C_t = C_f \left\{ 3 \left( \frac{l}{d} \right) + 4.5 \left( \frac{d}{l} \right)^{\frac{1}{2}} + 21 \left( \frac{d}{l} \right)^2 \right\}$$

$$C_t = 0.0453$$
 : based on wetted area  

$$C_t = C_f \left\{ 1 + 1.5 \left( \frac{d}{l} \right)^{\frac{3}{2}} + 7 \left( \frac{d}{l} \right)^3 \right\}$$

$$C_t = 0.00151$$
 Diambil 0,0453 (terbesar)

Sehingga didapatkan nilai *appendages resistance* sebesar 21233 N atau 21,233 kN.

#### 4.1.4 Total Tahanan

Maka total tahanan pada wahana bawah air adalah penjumlahan antara *bare hull resistance* dan *appendages resistance*.

$$R_T = R_{BH} + R_{app} (N)$$

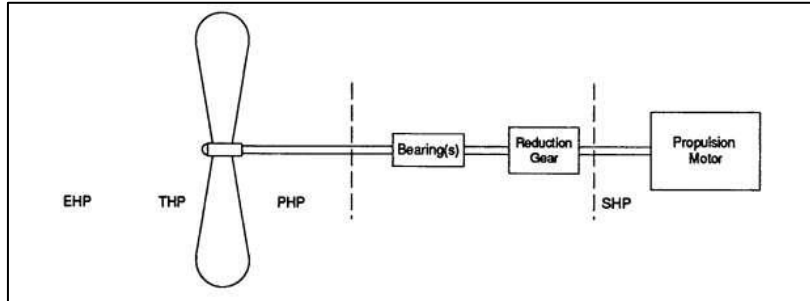
$$R_T = 117200 + 21233 (N)$$

$$R_T = 138433 N$$

$$R_T = 138,433 kN$$

## 4.2 Perhitungan Torsi

Definisi torsi dalam hal ini adalah torsi yang disalurkan kepada propeller untuk menggerakkan wahana bawah air. Nilai yang harus didapatkan terlebih dahulu untuk menghitung torsi adalah EHP (*Effective Horsepower*), PC (*Propulsive Coefficient*), SHP (*Shaft Horsepower*), dan PHP (*Propulsive Horsepower*).



Gambar 4. 2 Skema efisiensi system propulsi

### 4.2.1 Nilai EHP (Effective Horsepower)

Daya Efektif atau EHP adalah daya yang diperlukan untuk menggerakkan wahana bawah air atau untuk menarik wahana bawah air dengan kecepatan  $v$ . Perhitungan daya efektif (EHP) menurut buku *Submersible Vehicle System Design* hal 255 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} EHP &= R_T \times V \text{ (kW)} \\ EHP &= 138,433 \text{ kN} \times 21 \text{ knot (kW)} \\ EHP &= 138,433 \text{ kN} \times 10.8033 \text{ m/s (kW)} \\ EHP &= 1495.533 \text{ kW} \end{aligned}$$

### 4.2.2 Nilai PC (Propulsive Coefficient)

PC adalah nilai koefisien propulsi. Perhitungan koefisien propulsi (PC) menurut buku *Submersible Vehicle System Design* hal 257 adalah sebagai berikut:

$$P_c = \eta_H \times \eta_R \times \eta_o \times \eta_m$$

dimana;

$$\eta_H = \text{Hull efficiency} = 1$$

$$\eta_R = \text{Relative rotative ef.} = 0.95$$

$$\eta_o = \text{Open water ef.} = 0.75$$

$$\eta_m = \text{Machinery efficiency} = 0.95$$

(*Concepts in submarine design, hal-255*)

Maka nilai  $P_c$  adalah

$$P_c = 1 \times 0.95 \times 0.75 \times 0.95$$

$$P_c = 0.676875$$



#### 4.2.3 Nilai SHP (Shaft Horsepower)

Shaft Horse Power (SHP) adalah daya yang terukur hingga daerah di depan bantalan tabung poros (*stern tube*) dari sistem perporosan penggerak wahana bawah air. Perhitungan koefisien propulsi (PC) menurut buku *Submersible Vehicle System Design* hal 256 adalah sebagai berikut:

$$P_c = \frac{EHP}{SHP}$$

$$SHP = \frac{EHP}{P_c} = \frac{1495.533}{0.676875} = 2209.467 \text{ kW}$$

#### 4.2.4 Nilai PHP (Propulsive Horsepower)

Propulsive Horse Power (PHP) adalah daya yang diteruskan hingga ke baling baling (lihat gambar 4.2). Perhitungan Propulsive Horsepower (PHP) menurut buku *Submersible Vehicle System Design* hal 256 adalah sebagai berikut:

$$\eta_m = \frac{PHP}{SHP}$$

$$PHP = \eta_m \times SHP = 2098.994 \text{ kW}$$

#### 4.2.5 Nilai Torsi

Perhitungan torsi menurut buku *Submersible Vehicle System Design* hal 256 adalah sebagai berikut:

$$PHP = 2\pi nQ$$

$$Q = \frac{PHP}{2\pi n}$$

Dimana n adalah rotation per second (rps). Berdasarkan data baling baling pada bab 3, nilai RPM nya adalah 200 rpm. Sehingga jika dikonversikan menjadi 3,333 rps.

$$Q = \frac{PHP}{2\pi n} = 100,2804 \text{ kNm}$$

#### 4.2.6 Nilai Koefisien Torsi

Perhitungan koefisien torsi menurut buku *Submersible Vehicle System Design* hal 258 adalah sebagai berikut:

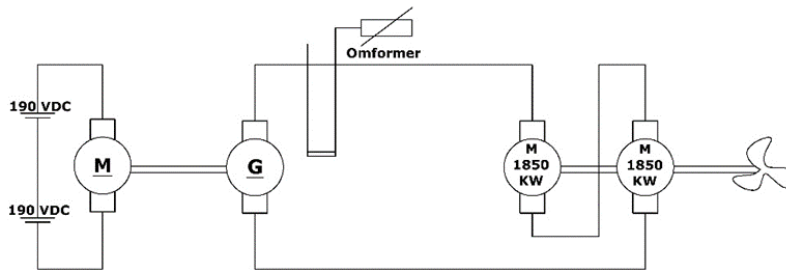
$$K_Q = \frac{Q}{D^5 n^2}$$

Dimana nilai Q adalah torsi sebesar 100,2804 kNm, n adalah rotation per second (rps) sebesar 3,333 rps. Selanjutnya nilai D adalah nilai diameter propeller sebesar 3,28 m.

$$K_Q = \frac{Q}{D^5 n^2} = 0.02375$$

### 4.3 Simulasi Rangkaian menggunakan Simulink-MATLAB

#### 4.3.1 Rangkaian I

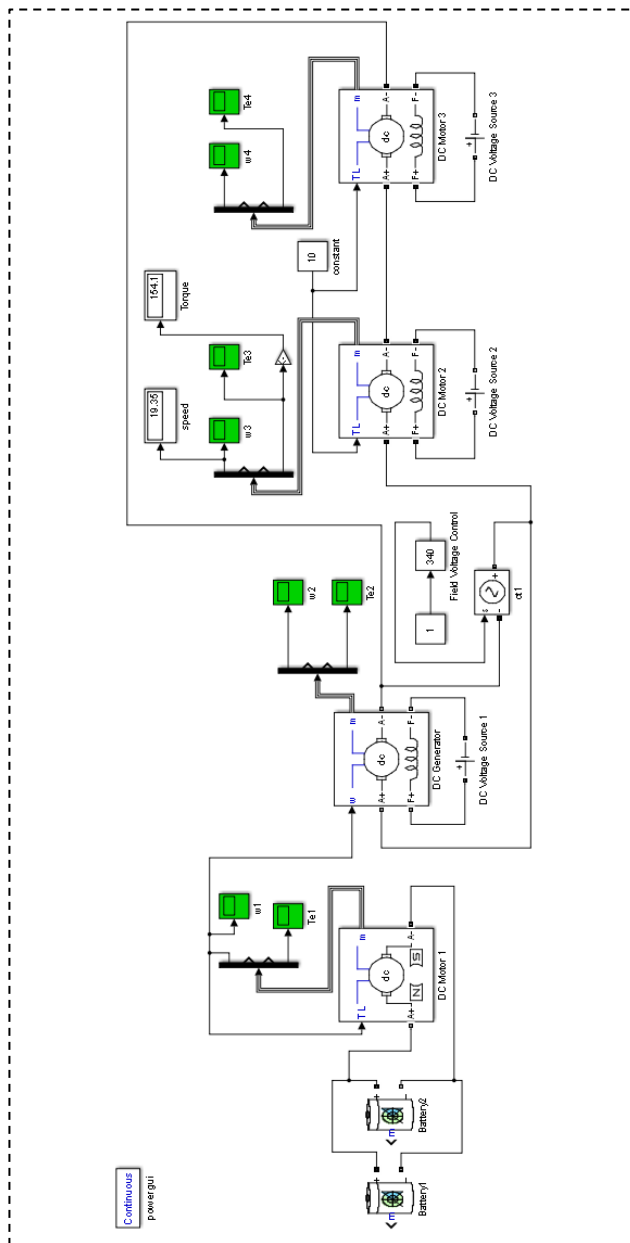


Gambar 4. 3 Rangkaian I menggunakan ohmformer

Gambar 4.3 menunjukkan gambar rangkaian I sistem propulsi. Gambar skematik rangkaian motor DC tersebut kemudian digunakan sebagai acuan dalam membuat rangkaian dengan menggunakan Simulink-Matlab sebelum dilakukan simulasi.

Rangkaian I mengikuti sistem ward leonard. Input atau masukan dari generator memiliki kecepatan yang konstan, yang disuplai oleh motor DC permanen magnet. Tegangan output dari generator DC ialah tegangan input pada motor DC penggerak utama sehingga dapat diatur. Kegunaan dari ohmformer pada generator DC ialah sebagai pengendali atau pengatur tegangan output dari generator DC. Pengaturan tersebut bertujuan untuk mengatur kecepatan pada motor DC penggerak utama.

Berdasarkan gambar 4.4, rangkaian I disimulasikan selama 10 detik menggunakan Simulink-Matlab. Input yang diberikan berupa tegangan output dari generator DC yang merupakan masukan bagi motor DC penggerak utama. Nilai tegangan yang diinput sebesar 10-volt hingga 340-volt dan torsi diberikan berupa torsi yang dibutuhkan wahana bawah air sebesar 100,2804 kNm. Tetapi untuk proses simulasi torsi dibuat skala 1/10 dari torsi sesungguhnya. Tegangan pada baterai adalah 195 V dengan kapasitas 10260 AH. Rangkaian tersebut pada software MATLAB disimulasikan untuk mendapatkan data putaran motor dan torsi motor dengan variasi tegangan yang masuk pada motor DC penggerak utama.



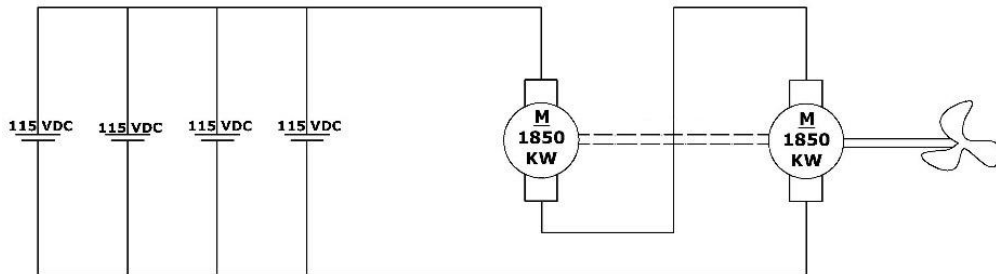
Gambar 4. 4 Rangkaian I menggunakan Simulink

Tabel 4. 2 Data putaran dan torsi motor hasil simulasi rangkaian I

<b>Torsi Kapal</b>	<b>Tegangan Masuk</b>	<b>Putaran Motor</b>		<b>Torsi Motor</b>
<b>(kNm)</b>	<b>(Volt)</b>	<b>(rad/s)</b>	<b>(rpm)</b>	<b>(kNm)</b>
100	10	0.56	5.348	153.7
100	20	1.13	10.791	153.7
100	30	1.69	16.138	153.7
100	40	2.26	21.581	153.7
100	50	2.83	27.025	15.37
100	60	3.41	32.563	153.7
100	70	3.97	37.911	153.7
100	80	4.54	43.354	153.7
100	90	5.11	48.797	153.7
100	100	5.68	54.240	153.7
100	110	6.25	59.683	153.7
100	120	6.82	65.126	153.7
100	130	7.39	70.569	153.7
100	140	7.96	76.012	153.7
100	150	8.53	81.455	153.7
100	160	9.1	86.899	153.7
100	170	9.67	92.342	153.7
100	180	10.24	97.785	153.7
100	190	10.81	103.228	153.7
100	200	11.38	108.671	153.7
100	210	11.95	114.114	153.7
100	220	12.52	119.557	153.7
100	230	13.09	125.000	153.7
100	240	13.66	130.443	153.7
100	250	14.23	135.886	153.7
100	260	14.8	141.330	153.7
100	270	15.37	146.773	153.7
100	280	15.94	152.216	154
100	290	16.51	157.659	154
100	300	17.08	163.102	154
100	310	17.65	168.545	154
100	320	18.22	173.988	154
100	330	18.78	179.336	154
100	340	19.35	184.779	154

Tabel 4.2 merupakan tabel hasil simulasi rangkaian I. Berdasarkan tabel tersebut, nilai putaran motor didapatkan sebesar 5.348 - 184.779 rpm dan torsi motor sebesar 153,7 kNm. Simulasi dilakukan dengan memasukkan variasi tegangan yang keluar dari generator atau yang masuk ke motor sebesar 10-volt hingga 340 volt.

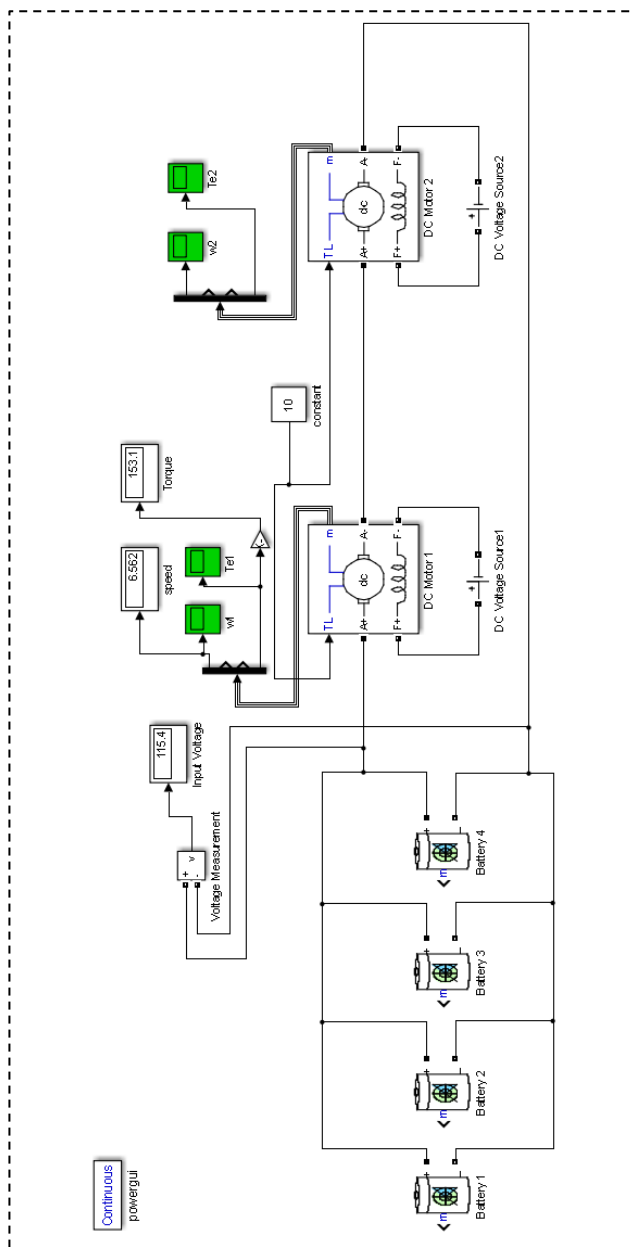
#### 4.3.2 Rangkaian II



Gambar 4. 5 Rangkaian II tanpa menggunakan ohmformer

Gambar 4.5 menunjukkan gambar rangkaian II sistem propulsi. Gambar skematik rangkaian motor DC tersebut kemudian digunakan sebagai acuan dalam membuat rangkaian dengan menggunakan Simulink-Matlab sebelum dilakukan simulasi.

Berdasarkan gambar 4.6, rangkaian II sistem propulsi disimulasikan menggunakan Simulink selama 10 detik. Input yang diberikan berupa torsi yang dibutuhkan wahana bawah air sebesar 100,2804 kNm. Tetapi untuk proses simulasi torsi dibuat skala 1/10 dari torsi sesungguhnya. Tegangan pada baterai adalah 115 V dengan kapasitas 10260 AH. Selanjutnya simulasi dilanjutkan pada variasi kondisi baterai dari kondisi 100 % hingga 5 %.



Gambar 4. 6 Rangkaian II menggunakan Simulink

Tabel 4. 3 Data putaran dan torsi motor hasil simulasi rangkaian II

<b>Torsi Kapal</b>	<b>Baterai</b>	<b>Tegangan Masuk</b>	<b>Putaran Motor</b>		<b>Torsi Motor</b>
<b>(kNm)</b>	<b>%</b>	<b>Volt</b>	<b>Rad/s</b>	<b>RPM</b>	<b>(kNm)</b>
100	100%	115	6.562	62.662	153.1
100	90%	107	6.081	58.069	153.1
100	80%	107	6.076	58.022	153.1
100	70%	107	6.070	57.964	153.1
100	60%	107	6.063	57.897	153.1
100	50%	107	6.052	57.792	153.1
100	40%	106	6.036	57.640	153.1
100	30%	106	6.010	57.391	153.1
100	20%	104.8	5.970	57.009	153.1
100	10%	102.0	5.798	55.367	153.1
100	5%	96.4	5.480	52.330	153.1

Tabel 4.3 merupakan tabel hasil simulasi rangkaian II. Berdasarkan tabel tersebut, nilai putaran motor didapatkan sebesar 52,330 – 62,662 rpm dan torsi motor sebesar 153,1 kNm. Simulasi dilakukan dengan memasukkan variasi kondisi baterai dari 100% hingga 5%.

#### 4.4 Perhitungan BHP dan Kecepatan Wahana Bawah Air

Daya yang dimaksud adalah daya rem (*Brake horsepower*) atau daya yang diterima oleh poros transmisi sistem penggerak wahana bawah air yang selanjutnya dioperasikan secara kontinyu untuk menggerakkan wahana bawah air pada kecepatan servisnya ( $V_s$ ).<sup>1</sup>

##### 4.4.1 Rangkaian I

Contoh perhitungan pada rangkaian I:

Ketika tegangan masuk 340 V dan putaran yang dihasilkan 3,080 rps.

- $Q = K_Q \times D^5 \times n^2$   
 $= 0,02375 \times (3,28)^5 \times (3,080)^2$   
 $= 96,3165 \text{ kNm}$   
 $K_Q$  merupakan nilai koefisien torsi sebesar 0,02375.  
 $D$  merupakan nilai diameter propeller sebesar 3,28 m.  
 $n$  merupakan nilai putaran sebesar 3,080 rps.
- $PHP = 2\pi \times Q \times n$   
 $= 2 \times 3,14 \times 96,3165 \times 3,080$   
 $= 1862,781 \text{ kW}$
- $SHP = PHP / \eta_m$   
 $= 1862,781 / 0,95$   
 $= 1960,822 \text{ kW}$   
 $\eta_m$  merupakan nilai *machinary efficiency* sebesar 0,95.
- $BHP = SHP / 0,85$   
 $= 1960,822 / 0,85$   
 $= 2306,850 \text{ kW}$
- $V_a = d_{prop} \times koef.J \times n_{prop}$   
 $= 3,28 \times 0,645 \times 3,080$   
 $= 6,51530$   
Koefisien J dianggap 0,645

---

<sup>1</sup> S.W. Adj, *Engine Propeller Matching*, (Surabaya:2005), h.6.



$$\begin{aligned}
 \bullet \quad V_s &= \frac{Va}{(1-w)} \\
 &= \frac{6,51530}{(1-0,36)} \\
 &= 10,1802 \text{ m/s} \\
 &= 19,7903 \text{ knot}
 \end{aligned}$$

Nilai w didapatkan dari tabel berikut ini:

Tabel 4. 4 Table nilai w dan t

		w	t
Single Screw	40° L	0,36	0,11

Jadi pada saat tegangan masuk sebesar 340 V, daya yang diterima oleh poros transmisi sistem penggerak yang selanjutnya dioperasikan secara kontinyu pada kecepatan 19,8 knot adalah sebesar 2306,850 kW. Berikut adalah tabel hasil perhitungan daya dan kecepatan pada variasi tegangan 10 – 340 V.

Tabel 4. 5 Daya dan kecepatan wahana bawah air pada rangkaian I

Tegangan masuk (Volt)	Putaran Mesin		Q	PHP	SHP	BHP	Va	Vs	
	(RPM)	(RPS)	(kNm)	(KW)	(KW)	(KW)		(m/s)	knot
10	5.348	0.089	0.0806	0.045	0.048	0.056	0.18856	0.2946	0.5727
20	10.791	0.180	0.3284	0.371	0.391	0.459	0.38048	0.5945	1.1557
30	16.138	0.269	0.7347	1.241	1.306	1.537	0.56904	0.8891	1.7284
40	21.581	0.360	1.3138	2.968	3.124	3.675	0.76096	1.1890	2.3114
50	27.025	0.450	2.0602	5.827	6.134	7.217	0.95288	1.4889	2.8944
60	32.563	0.543	2.9912	10.195	10.731	12.625	1.14817	1.7940	3.4876
70	37.911	0.632	4.0543	16.088	16.934	19.923	1.33673	2.0886	4.0603
80	43.354	0.723	5.3021	24.059	25.326	29.795	1.52866	2.3885	4.6433
90	48.797	0.813	6.7170	34.307	36.113	42.485	1.72058	2.6884	5.2262
100	54.240	0.904	8.2991	47.116	49.595	58.347	1.91250	2.9883	5.8092
110	59.683	0.995	10.0484	62.771	66.075	77.735	2.10443	3.2882	6.3922
120	65.126	1.085	11.9648	81.559	85.852	101.002	2.29635	3.5880	6.9752
130	70.569	1.176	14.0484	103.765	109.227	128.502	2.48827	3.8879	7.5581
140	76.012	1.267	16.2991	129.676	136.501	160.589	2.68020	4.1878	8.1411
150	81.455	1.358	18.7170	159.575	167.974	197.617	2.87212	4.4877	8.7241
160	86.899	1.448	21.3020	193.751	203.948	239.939	3.06404	4.7876	9.3070
170	92.342	1.539	24.0542	232.487	244.723	287.909	3.25597	5.0875	9.8900
180	97.785	1.630	26.9736	276.070	290.600	341.882	3.44789	5.3873	10.4730
190	103.228	1.720	30.0601	324.785	341.879	402.211	3.63982	5.6872	11.0560
200	108.671	1.811	33.3137	378.918	398.862	469.249	3.83174	5.9871	11.6389
210	114.114	1.902	36.7345	438.756	461.848	543.351	4.02366	6.2870	12.2219
220	119.557	1.993	40.3225	504.582	531.139	624.870	4.21559	6.5869	12.8049
230	125.000	2.083	44.0776	576.684	607.036	714.160	4.40751	6.8867	13.3879
240	130.443	2.174	47.9999	655.347	689.839	811.575	4.59943	7.1866	13.9708

Tegangan masuk (Volt)	Putaran Mesin		Q	PHP	SHP	BHP	Va	Vs	
	(RPM)	(RPS)	(kNm)	(KW)	(KW)	(KW)		(m/s)	knot
250	135.886	2.265	52.0893	740.856	779.848	917.468	4.79136	7.4865	14.5538
260	141.330	2.355	56.3459	833.497	877.365	1032.195	4.98328	7.7864	15.1368
270	146.773	2.446	60.7696	933.556	982.691	1156.107	5.17520	8.0863	15.7197
280	152.216	2.537	65.3605	1041.319	1096.126	1289.559	5.36713	8.3861	16.3027
290	157.659	2.628	70.1186	1157.071	1217.970	1432.906	5.55905	8.6860	16.8857
300	163.102	2.718	75.0438	1281.099	1348.525	1586.500	5.75098	8.9859	17.4687
310	168.545	2.809	80.1361	1413.686	1488.091	1750.695	5.94290	9.2858	18.0516
320	173.988	2.900	85.3956	1555.121	1636.969	1925.846	6.13482	9.5857	18.6346
330	179.336	2.989	90.7257	1702.965	1792.595	2108.935	6.32338	9.8803	19.2073
340	184.779	3.080	96.3165	1862.781	1960.822	2306.850	6.51530	10.1802	19.7903

Berdasarkan hasil perhitungan pada tabel 4.5, maka dapat dikatakan bahwa rangkaian I menghasilkan kecepatan berkisar 0,572 – 19,8 knot dan BHP berkisar 0,056 kW – 2306,850 kW dengan variasi tegangan masuk. Sehingga rangkaian I dapat digunakan dalam kecepatan *silent run*, *sailing run* / jelajah dan pengejaran/patroli.

#### 4.4.2 Rangkaian II

Contoh perhitungan pada rangkaian II:

Ketika kondisi baterai 100% dan nilai putaran yang dihasilkan 1,0444 rps

- $Q = K_Q \times D^5 \times n^2$   
 $= 0,02375 \times (3,28)^5 \times (1,0444)^2$   
 $= 9.8361 \text{ kNm}$   
 $K_Q$  merupakan nilai koefisien torsi sebesar 0,02375.  
 $D$  merupakan nilai diameter propeller sebesar 3,28 m.  
 $n$  merupakan nilai putaran sebesar 1,0444 rps.
- $PHP = 2\pi \times Q \times n$   
 $= 2 \times 3,14 \times 9.81216 \times 1,0444$   
 $= 64,5120 \text{ kW}$
- $SHP = PHP / \eta_m$   
 $= 64,5120 / 0,95$   
 $= 65.8285 \text{ kW}$   
 $\eta_m$  merupakan nilai *machinary efficiency* sebesar 0,95.
- $BHP = SHP / 0,85$   
 $= 65.8285 / 0,85$   
 $= 77.4453 \text{ kW}$

- $$V_a = d_{prop} \times koef.J \times n_{prop}$$

$$= 3,28 \times 0,645 \times 1,0444$$

$$= 2.2095$$

Koefisien J dianggap 0,645
- $$V_s = \frac{V_a}{(1-w)}$$

$$= \frac{2,2095}{(1-0,36)}$$

$$= 3.4523 \text{ m/s}$$

$$= 6.7113 \text{ knot}$$

Nilai w didapatkan dari table berikut ini:

Tabel 4. 6 Table nilai w dan t

		w	t
Single Screw	40° L	0,36	0,11

Jadi pada saat kondisi baterai 100 %, daya yang diterima oleh poros transmisi sistem penggerak yang selanjutnya dioperasikan secara kontinyu pada kecepatan 6,7113 knot adalah sebesar 77.4453 kW. Berikut adalah tabel hasil perhitungan daya dan kecepatan pada variasi kondisi baterai 100% - 5%.

Berikut adalah data hasil perhitungan:

Tabel 4. 7 Daya dan kecepatan wahana bawah air pada rangkaian II

Baterai	Putaran Motor		Q	PHP	SHP	BHP	V <sub>a</sub>	V <sub>s</sub>	
	RPM	RPS	(kNm)	(KW)	(KW)	(KW)		(m/s)	knot
100%	62.6625	1.0444	9.8361	64.5120	65.8285	77.4453	2.2095	3.4523	6.7113
90%	58.0693	0.9678	8.4470	51.3401	52.3878	61.6328	2.0475	3.1993	6.2194
80%	58.0215	0.9670	8.4331	51.2135	52.2587	61.4809	2.0458	3.1966	6.2143
70%	57.9642	0.9661	8.4165	51.0620	52.1041	61.2989	2.0438	3.1935	6.2081
60%	57.8974	0.9650	8.3971	50.8855	51.9240	61.0871	2.0415	3.1898	6.2010
50%	57.7923	0.9632	8.3666	50.6091	51.6419	60.7552	2.0378	3.1840	6.1897
40%	57.6396	0.9607	8.3224	50.2087	51.2334	60.2746	2.0324	3.1756	6.1734
30%	57.3913	0.9565	8.2509	49.5627	50.5742	59.4990	2.0236	3.1619	6.1468
20%	57.0093	0.9502	8.1414	48.5797	49.5711	58.3189	2.0101	3.1409	6.1059
10%	55.3668	0.9228	7.6791	44.5006	45.4088	53.4221	1.9522	3.0504	5.9299
5%	52.3301	0.8722	6.8598	37.5728	38.3396	45.1054	1.8452	2.8831	5.6047

Berdasarkan hasil perhitungan pada tabel 4.7, bahwa rangkaian II menghasilkan kecepatan berkisar 5,605 -6,711 knot dan BHP berkisar 45,105 kW – 77,445 kW dengan variasi kondisi baterai. Sehingga rangkaian II dapat dikatakan menghasilkan kecepatan wahana bawah air pada *sailing run*.

#### 4.5 Perhitungan Daya Output Motor Penggerak Utama

Berdasarkan data hasil simulasi, daya motor yang dihasilkan dapat dihitung melalui rumus:

$$P = T \times \omega$$

P merupakan nilai daya output motor (kW)

T merupakan nilai torsi motor (kNm)

$\omega$  merupakan nilai *angular speed* (rad/s)

##### 4.5.1 Rangkaian I

Contoh perhitungan pada rangkaian I:

Berdasarkan hasil simulasi, kondisi tegangan masuk 340 V dengan nilai torsi motor 154 kNm dan nilai angular speed 19,35 rad/s

$$\begin{aligned} P &= T \times \omega \\ &= 154 \times 19,35 \\ &= 2979,9 \text{ kW} \end{aligned}$$

Jadi pada saat tegangan masuk 340 V, daya motor yang dihasilkan adalah sebesar 2979,9 kW. Berikut adalah tabel hasil perhitungan daya output motor pada variasi tegangan masuk.

Tabel 4. 8 Daya *output* motor pada rangkaian I

Tegangan Masuk	Putaran Motor	Torsi Motor	Daya Output Motor
(Volt)	(rad/s)	(kNm)	(KW)
10	0.56	153.7	86.072
20	1.13	153.7	173.681
30	1.69	153.7	259.753
40	2.26	153.7	347.362
50	2.83	153.7	434.971
60	3.41	153.7	524.117
70	3.97	153.7	610.189
80	4.54	153.7	697.798
90	5.11	153.7	785.407
100	5.68	153.7	873.016
110	6.25	153.7	960.625
120	6.82	153.7	1048.234
130	7.39	153.7	1135.843
140	7.96	153.7	1223.452
150	8.53	153.7	1311.061
160	9.1	153.7	1398.67
170	9.67	153.7	1486.279

<b>Tegangan Masuk</b>	<b>Putaran Motor</b>	<b>Torsi Motor</b>	<b>Daya Output Motor</b>
<b>(Volt)</b>	<b>(rad/s)</b>	<b>(kNm)</b>	<b>(KW)</b>
180	10.24	153.7	1573.888
190	10.81	153.7	1661.497
200	11.38	153.7	1749.106
210	11.95	153.7	1836.715
220	12.52	153.7	1924.324
230	13.09	153.7	2011.933
240	13.66	153.7	2099.542
250	14.23	153.7	2187.151
260	14.8	153.7	2274.76
270	15.37	153.7	2362.369
280	15.94	154	2454.76
290	16.51	154	2542.54
300	17.08	154	2630.32
310	17.65	154	2718.1
320	18.22	154	2805.88
330	18.78	154	2892.12
340	19.35	154	2979.9

#### 4.5.2 Rangkaian II

Contoh perhitungan pada rangkaian II:

Berdasarkan hasil simulasi, ketika kondisi baterai penuh (100%) dengan nilai torsi motor 153,1 kNm dan nilai angular speed 6,554 rad/s

$$\begin{aligned}
 P &= T \times \omega \\
 &= 153,1 \times 6,54 \\
 &= 1004,6422 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Jadi pada saat kondisi baterai 100%, daya motor yang dihasilkan adalah sebesar 1004,6422 kW. Berikut adalah tabel hasil perhitungan daya output motor pada variasi tegangan masuk.

Tabel 4. 9 Daya output motor pada rangkaian II

<b>Baterai</b>	<b>Putaran Motor</b>	<b>Torsi Motor</b>	<b>Daya output motor</b>
<b>%</b>	<b>(rad/s)</b>	<b>(kNm)</b>	<b>(KW)</b>
100%	6.554	153.1	1004.6422
90%	6.081	153.1	931.0011
80%	6.076	153.1	930.2356
70%	6.07	153.1	929.317
60%	6.063	153.1	928.2453

Baterai	Putaran Motor	Torsi Motor	Daya <i>output</i> motor
%	(rad/s)	(kNm)	(KW)
50%	6.052	153.1	926.5612
40%	6.036	153.1	924.1116
30%	6.01	153.1	920.131
20%	5.97	153.1	914.007
10%	5.798	153.1	887.6738
5%	5.48	153.1	838.988

#### 4.6 Analisa *Speed – Power Performance*

Sistem penggerak wahana bawah air memiliki beberapa definisi tentang daya yang ditransmisikan. Mulai dari daya yang dikeluarkan oleh motor penggerak hingga daya yang diterima poros transmisi sistem penggerak wahana bawah air yang selanjutnya dioperasikan secara kontinyu untuk menggerakkan wahana bawah air pada kecepatan servisnya. Rasio dari daya daya tersebut sering dinyatakan dengan istilah efisiensi.<sup>2</sup>

Dalam proses ini akan dicari nilai efisiensi dari BHP, daya *output* motor dan putaran motor pada saat dimana titik operasi yang telah dihasilkan sebelumnya. Berikut parameter yang diperlukan:

- BHP wahana bawah air berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya.
- Daya output Motor berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya.
- RPM maksimum motor sebesar 200 rpm.
- Nilai persentase BHP
  - BHP (%) :  $(\text{BHP} / \text{Daya output motor}) \times 100\%$
- Nilai persentase RPM
  - RPM (%) :  $(\text{Putaran motor yang dihasilkan} / \text{putaran motor maksimum}) \times 100\%$

---

<sup>2</sup> S.W. Adj, *Engine Propeller Matching*, (Surabaya:2005), h.3.

#### 4.6.1 Rangkaian I

Contoh perhitungan pada rangkaian I:

Ketika kondisi tegangan masuk 340 V dengan nilai putaran motor 184,779 rpm, nilai BHP 2306,850 KW dan daya motor 2979.9 KW

- Nilai persentase BHP
  - BHP (%) :  $(\text{BHP} / \text{Daya output motor}) \times 100\%$   
 :  $(2306,850 / 2979,9) \times 100\%$   
 : 77,41 %
- Nilai persentase RPM
  - RPM (%) :  $(\text{Putaran motor yang dihasilkan} / \text{putaran motor maksimum}) \times 100\%$   
 :  $(184,779 / 200) \times 100\%$   
 : 92,39 %

Jadi pada saat tegangan masuk 340 V, nilai efisiensi daya adalah sebesar 77,41 % dan putaran sebesar 92,39 %.

Tabel 4. 10 *Speed power performance* pada rangkaian I

Tegangan masuk	Putaran motor	Vs	BHP	Daya output motor	RPM (%)	BHP (%)
(Volt)	(RPM)	(Knot)	(KW)	(KW)		
10	5.348	0.573	0.056	86.072	2.67%	0.06%
20	10.791	1.156	0.459	173.681	5.40%	0.26%
30	16.138	1.728	1.537	259.753	8.07%	0.59%
40	21.581	2.311	3.675	347.362	10.79%	1.06%
50	27.025	2.894	7.217	434.971	13.51%	1.66%
60	32.563	3.488	12.625	524.117	16.28%	2.41%
70	37.911	4.060	19.923	610.189	18.96%	3.27%
80	43.354	4.643	29.795	697.798	21.68%	4.27%
90	48.797	5.226	42.485	785.407	24.40%	5.41%
100	54.240	5.809	58.347	873.016	27.12%	6.68%
110	59.683	6.392	77.735	960.625	29.84%	8.09%
120	65.126	6.975	101.002	1048.234	32.56%	9.64%
130	70.569	7.558	128.502	1135.843	35.28%	11.31%
140	76.012	8.141	160.589	1223.452	38.01%	13.13%
150	81.455	8.724	197.617	1311.061	40.73%	15.07%
160	86.899	9.307	239.939	1398.670	43.45%	17.15%
170	92.342	9.890	287.909	1486.279	46.17%	19.37%
180	97.785	10.473	341.882	1573.888	48.89%	21.72%
190	103.228	11.056	402.211	1661.497	51.61%	24.21%

Tegangan masuk	Putaran motor	Vs	BHP	Daya output motor	RPM (%)	BHP (%)
(Volt)	(RPM)	(Knot)	(KW)	(KW)		
200	108.671	11.639	469.249	1749.106	54.34%	26.83%
210	114.114	12.222	543.351	1836.715	57.06%	29.58%
220	119.557	12.805	624.870	1924.324	59.78%	32.47%
230	125.000	13.388	714.160	2011.933	62.50%	35.50%
240	130.443	13.971	811.575	2099.542	65.22%	38.65%
250	135.886	14.554	917.468	2187.151	67.94%	41.95%
260	141.330	15.137	1032.195	2274.760	70.66%	45.38%
270	146.773	15.720	1156.107	2362.369	73.39%	48.94%
280	152.216	16.303	1289.559	2454.760	76.11%	52.53%
290	157.659	16.886	1432.906	2542.540	78.83%	56.36%
300	163.102	17.469	1586.500	2630.320	81.55%	60.32%
310	168.545	18.052	1750.695	2718.100	84.27%	64.41%
320	173.988	18.635	1925.846	2805.880	86.99%	68.64%
330	179.336	19.207	2108.935	2892.120	89.67%	72.92%
340	184.779	19.790	2306.850	2979.900	92.39%	77.41%

Berdasarkan hasil perhitungan pada tabel 4.10, bahwa rangkaian I menghasilkan nilai efisiensi BHP berkisar 0,06% - 77,41% dan rpm berkisar 2,67 – 92,39%.

#### 4.6.2 Rangkaian II

Contoh perhitungan pada rangkaian II:

Ketika baterai penuh dengan nilai putaran motor 62.5861 rpm, nilai BHP 77,1624 KW dan daya motor 1003.4174 KW

- Nilai persentase BHP
  - BHP (%) :  $(\text{BHP} / \text{Daya output motor}) \times 100\%$   
 :  $(77,4453 / 1004.6422) \times 100\%$   
 : 7,71 %
- Nilai persentase RPM
  - RPM (%) :  $(\text{Putaran motor yang dihasilkan} / \text{putaran motor maksimum}) \times 100\%$   
 :  $(62.6625 / 200) \times 100\%$   
 : 31,33 %

Jadi pada saat kondisi 100% baterai, nilai efisiensi daya adalah sebesar 7,71 % dan putaran sebesar 31,33 %.



Tabel 4. 11 *Speed power performance* pada rangkaian II

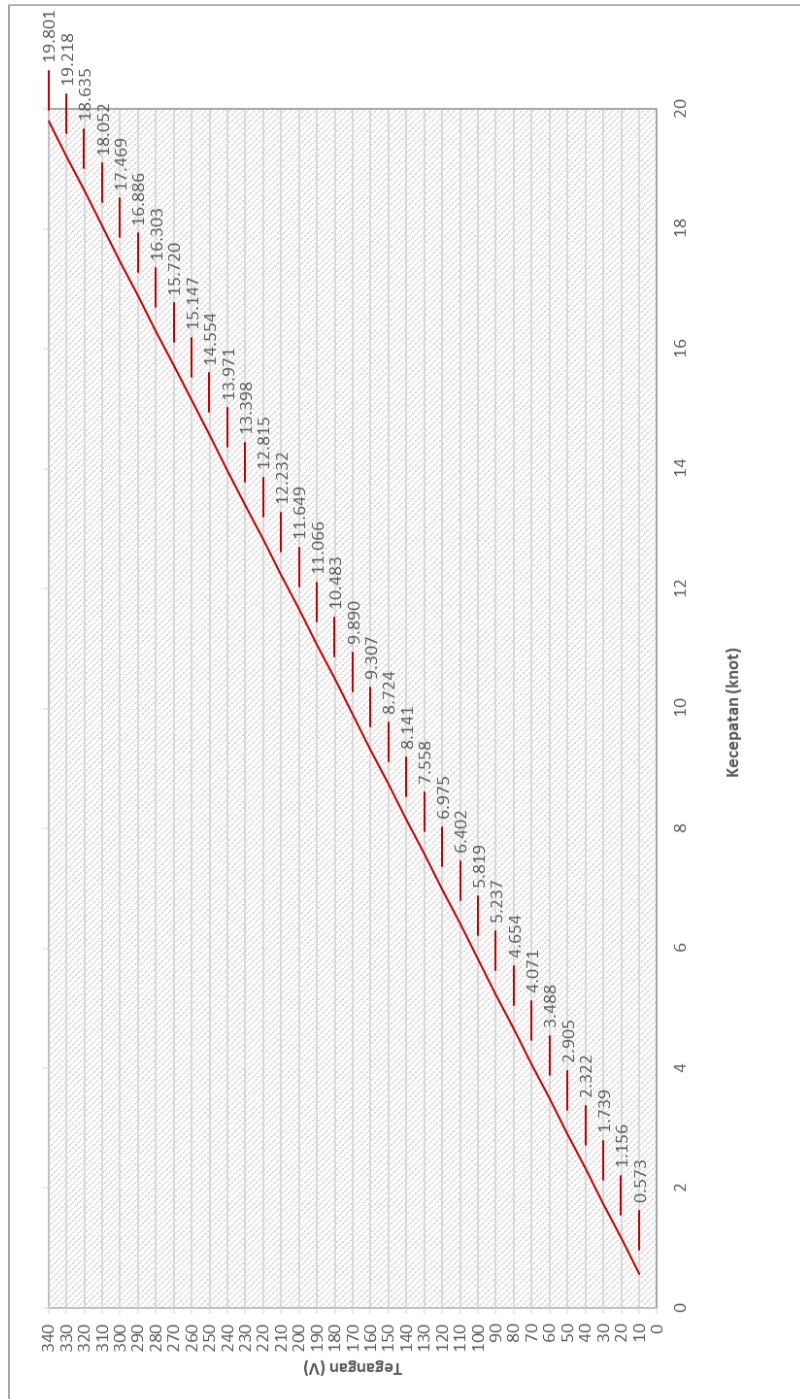
<b>Baterai</b>	<b>Putaran Motor</b>	<b>Vs</b>	<b>BHP</b>	<b>Daya output motor</b>	<b>RPM</b>	<b>BHP</b>
<b>%</b>	<b>(RPM)</b>	<b>knot</b>	<b>(kw)</b>	<b>(kw)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>
100%	62.6625	6.7113	77.4453	1004.6422	31.33%	7.71%
90%	58.0693	6.2194	61.6328	931.0011	29.03%	6.62%
80%	58.0215	6.2143	61.4809	930.2356	29.01%	6.61%
70%	57.9642	6.2081	61.2989	929.3170	28.98%	6.60%
60%	57.8974	6.2010	61.0871	928.2453	28.95%	6.58%
50%	57.7923	6.1897	60.7552	926.5612	28.90%	6.56%
40%	57.6396	6.1734	60.2746	924.1116	28.82%	6.52%
30%	57.3913	6.1468	59.499	920.1310	28.70%	6.47%
20%	57.0093	6.1059	58.3189	914.0070	28.50%	6.38%
10%	55.3668	5.9299	53.4221	887.6738	27.68%	6.02%
5%	52.3301	5.6047	45.1054	838.9880	26.17%	5.38%

Berdasarkan hasil perhitungan pada tabel 4.11, bahwa rangkaian II menghasilkan nilai efisiensi BHP berkisar 5,38% - 7,71% dan rpm berkisar 26,17 - 31,33%.

## 4.7 Analisa Grafik

### 4.7.1 Rangkaian I

#### Grafik Tegangan Masuk Terhadap Kecepatan Wahana Bawah Air



Gambar 4. 7 Grafik tegangan masuk - kecepatan wahana bawah air pada rangkaian I

Gambar 4.7 menunjukkan grafik hubungan antara kecepatan wahana bawah air dengan tegangan masuk pada rangkaian I. Grafik tersebut berdasarkan tabel 4.5 yang merupakan perhitungan daya dan kecepatan wahana bawah air pada variasi input tegangan (halaman 43).

Berdasarkan gambar 4.7, dapat disimpulkan bahwa hubungan antara kecepatan wahana bawah air dengan tegangan masuk adalah berbanding lurus, ketika tegangan bertambah maka nilai kecepatan wahana bawah air akan mengikuti pertambahan juga. Pada tegangan 10 V maka nilai kecepatan wahana bawah air yang dihasilkan bernilai 0,573 knot dan ketika tegangan mencapai 340 V maka nilai kecepatan wahana bawah air yang dihasilkan bernilai 19,800 knot.

Hubungan antara putaran motor dengan tegangan yang masuk sesuai dengan persamaan:

$$V_t = E_a + I_a \cdot R_a$$

$$E_a = C \cdot n \cdot \phi$$

$$E_a = V_t - I_a \cdot R_a$$

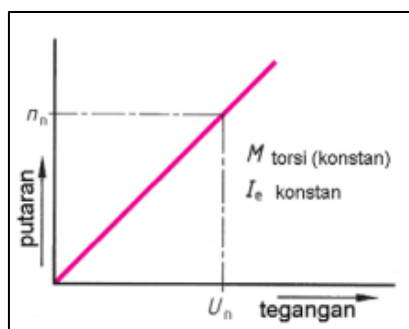
$$C \cdot n \cdot \phi = V_t - I_a \cdot R_a$$

$$n = \frac{V_t - I_a \cdot R_a}{C \cdot \phi}$$

Sehingga jika tegangan sumber DC diatur besarnya, maka putaran motor akan berbanding lurus dengan tegangan yang masuk ke rangkaian jangkar (gambar 4.8). Selanjutnya kecepatan wahana bawah air akan berbanding lurus dengan putaran motor yang dihasilkan.

$$V_a = d_{prop} \times J \times n$$

$$V_s = \frac{V_a}{(1 - w)} = d_{prop} \times J \times n$$



Gambar 4. 8 Karakteristik putaran fungsi tegangan jangkar

(Sumber: Siswoyo. 2008. *Teknik Listrik Industri* jilid 2. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan menengah, Departemen Pendidikan Nasional.)

**Grafik *Speed Power Performance***



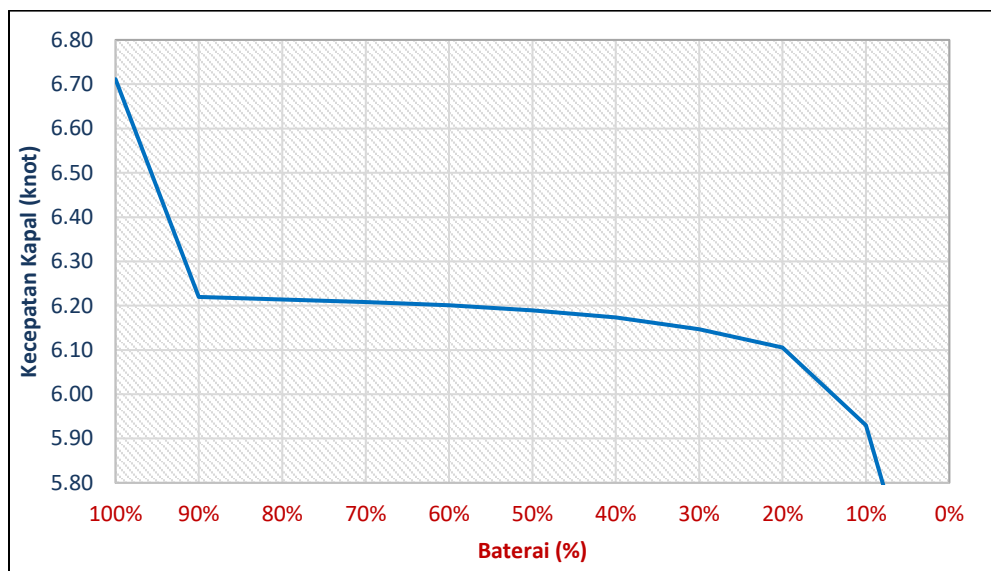
Gambar 4. 9 Grafik *speed power performance* rangkaian I

Gambar 4.9 menunjukkan hubungan efisiensi antara daya motor yang dihasilkan dengan daya BHP wahana bawah air pada rangkaian menggunakan ohmformer yang menghasilkan putaran 5,348 – 184,779 rpm atau kecepatan 0,573 – 19,8 knot. Grafik diatas berdasarkan tabel 4.10 yang merupakan perhitungan *speed power performace* pada rangkaian I (halaman 49). Nilai efisiensi maksimum pada rangkaian menggunakan ohmformer adalah ketika 77,41 % BHP dan 92,39 % rpm.

Selanjutnya dapat dikatakan bahwa daya motor yang dihasilkan tidak sepenuhnya dipakai menjadi daya wahana bawah air (BHP) untuk menggerakkan wahana bawah air. Hal ini dikarenakan terdapat *losses* yang terjadi pada sistem perporosan serta nilai tahanan dan torsi wahana bawah air.

#### 4.7.2 Rangkaian II

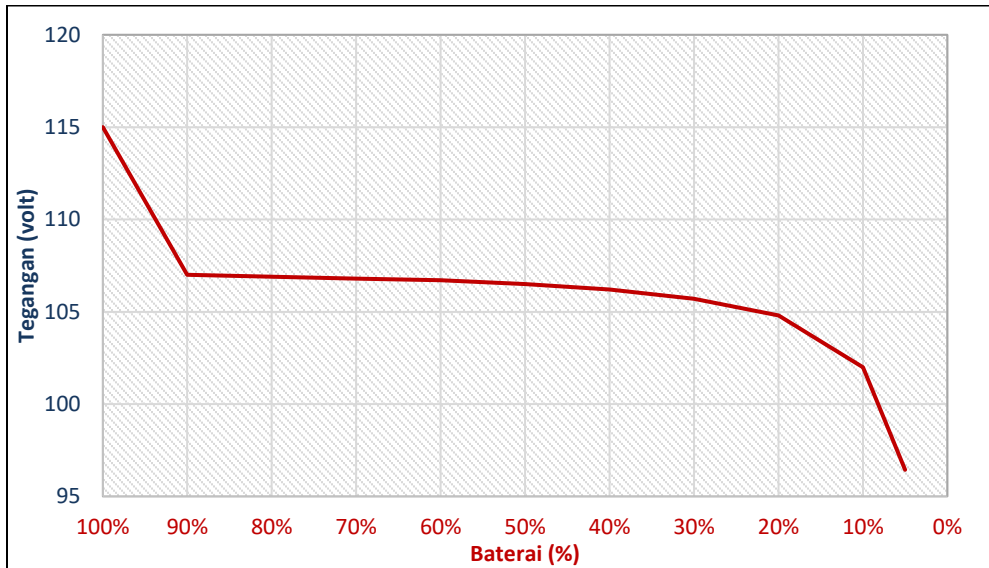
##### Grafik Kondisi Baterai terhadap Kecepatan Wahana Bawah Air



Gambar 4. 10 Grafik kondisi baterai - kecepatan wahana bawah air pada rangkaian II.

Gambar 4.10 menunjukkan hubungan antara kondisi baterai (%) terhadap kecepatan wahana bawah air (knot). Grafik diatas berdasarkan tabel 4.7 yang merupakan perhitungan daya dan kecepatan bawah air (halaman 45). Penurunan kondisi baterai dari 100% hingga 5% akan diikuti dengan penurunan kecepatan wahana bawah air. *Trendline* penurunan tersebut dapat dilihat pada grafik diatas.

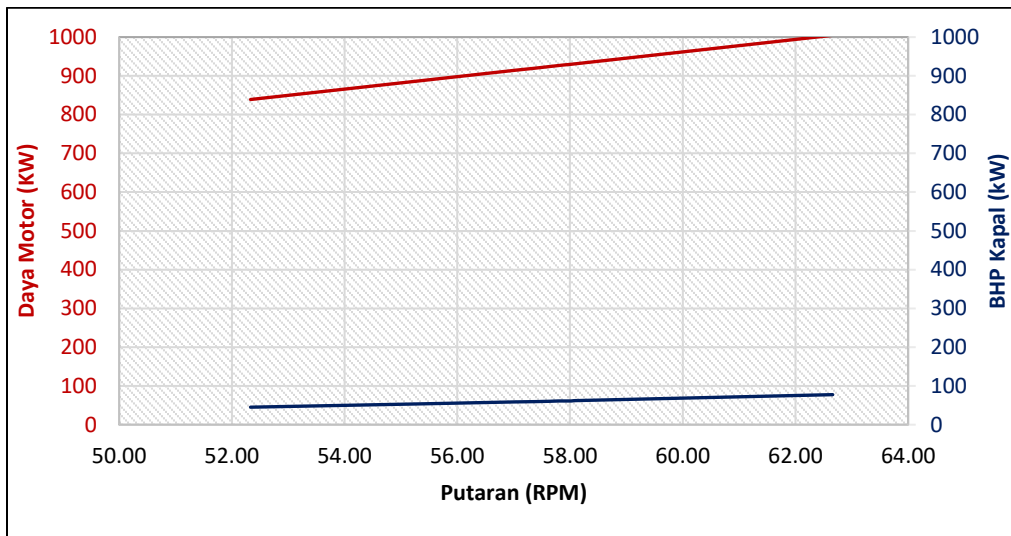
### Grafik Kondisi Baterai terhadap Penurunan Nilai Tegangan



Gambar 4. 11 Grafik kondisi baterai - penurunan nilai tegangan pada rangkaian II.

Gambar 4.11 menunjukkan hubungan antara kondisi baterai (%) terhadap penurunan nilai tegangan (volt). Grafik diatas berdasarkan tabel 4.3 yang merupakan data putaran dan torsi motor hasil simulasi pada variasi kondisi baterai (halaman 41). Penurunan kondisi baterai dari 100% hingga 5% akan diikuti dengan penurunan nilai tegangan yang keluar. *Trendline* penurunan tersebut dapat dilihat pada grafik diatas. Selanjutnya dapat disimpulkan bahwa kondisi baterai mempengaruhi tegangan yang keluar dari baterai atau yang masuk ke motor.

### Grafik *Speed Power Performance*



Gambar 4. 12 Grafik *speed power performance* rangkaian II.

Gambar 4.12 menunjukkan hubungan efisiensi antara daya motor (KW) dengan daya wahana bawah air (KW) pada rangkaian II yang menghasilkan putaran 52 – 63 rpm atau kecepatan wahana bawah air 5,6 – 6,7 knot. Grafik diatas berdasarkan tabel 4.11 yang merupakan perhitungan *speed power performance* pada rangkaian II (halaman 51). Nilai efisiensi maksimum pada rangkaian tanpa menggunakan ohmformer adalah ketika 7,71 % BHP dan 31,33 % rpm.

Selanjutnya dapat dikatakan bahwa daya motor yang dihasilkan tidak sepenuhnya dipakai menjadi daya wahana bawah air (BHP) untuk menggerakkan wahana bawah air. Hal ini dikarenakan terdapat *losses* yang terjadi pada sstem perporosan serta nilai tahanan dan torsi wahana bawah air.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Setelah dilakukan simulasi, perhitungan dan analisa pada setiap rangkaian, maka dapat ditarik kesimpulan:

1. Karakteristik dan performa pada rangkaian motor DC yang dirangkai seri menggunakan ohmformer adalah sebagai berikut:
  - a. Nilai torsi yang dibutuhkan untuk menggerakkan wahana bawah air tersebut sebesar 100,2804 kNm.
  - b. Nilai kecepatan yang dihasilkan berkisar 0,573 - 19,800 knot pada tegangan 10 – 340 volt. Pada kecepatan tersebut biasanya digunakan untuk kecepatan *silent run*, *sailing run* dan pengejaran/patroli.
  - c. Nilai daya yang dihasilkan berkisar 0,056 – 2306 kW pada tegangan 10 – 340 volt.
  - d. Nilai efisiensi maksimum pada rangkaian menggunakan ohmformer adalah ketika 77,41 % BHP dan 92,39 % rpm.
2. Karakteristik dan performa pada rangkaian motor DC yang dirangkai seri tanpa menggunakan ohmformer adalah sebagai berikut:
  - a. Nilai kecepatan yang dihasilkan berkisar 5.605 - 6.711 knot pada tegangan 115 volt. Pada kecepatan tersebut biasanya digunakan untuk kecepatan *sailing run*.
  - b. Nilai daya yang dihasilkan berkisar 45.1054 – 77.4453 kW pada tegangan 115 volt.
  - c. Nilai efisiensi maksimum pada rangkaian tanpa menggunakan ohmformer adalah ketika 7,71 % BHP dan 31,33 % rpm.

#### **5.2 Saran**

1. Sebaiknya menggunakan software yang lebih baik daripada MATLAB untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dan akurat agar parameter yang digunakan mesin tidak terbatas
2. Dilakukannya uji coba langsung agar bisa mengetahui perbedaan nilai hasil simulasi dengan nilai real yang diambil ketika uji coba.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR PUSTAKA

- Sarwito, Sardono. 2006. *Sistem Kelistrikan dan Pengendalian*. FTK ITS: Surabaya.
- S.W, Adji. 2005. *Engine Propeller Matching*. FTK ITS: Surabaya.
- Burcher, Roy. 1999. *Concepts in Submersible Design*. Publish: Cambridge University Press
- Allmendinger, Eugene. 1990. *Submersible Vehicle Systems Design*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers: Jersey City.
- Betram, Volker. 2012. *Practical Ship Hydrodynamics*. Elsevier: USA.
- Adnanes, Alf Kare. 2003. *Maritime Electrical Installations and Diesel Electric Propulsion*. ABB
- Bagus, Gelis Pratama Putra. (2015). *Studi Desain Midget Submarine Untuk Aplikasi Intelijen Dan Monitoring Perairan Indonesia*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Said, Muhammad Iqbal. 2013. *System Diesel Electric Propulsion Sebagai Alternative Penggerak Pada Kapal Ikan 30 GT*. Program Studi Teknik Sistem Perkapalan Universitas Hasanuddin.
- Anonim. <https://id.wikipedia.org/wiki/MATLAB>. Diakses pada tanggal 27 Juli 2017
- Anonim. <https://id.wikipedia.org/wiki/Simulink>. Diakses pada tanggal 27 Juli 2017
- Anonim. [https://id.wikipedia.org/wiki/Kapal\\_selam](https://id.wikipedia.org/wiki/Kapal_selam). Diakses pada tanggal 27 Juli 2017

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **LAMPIRAN**

- 1. Data wahana bawah air**
- 2. Model wahana bawah air**
- 3. Gambar skematik rangkaian propulsi**
- 4. Gambar rangkaian pada SimulinkMATLAB**
- 5. Hasil simulasi rangkaian**

## 1. Data wahana bawah air

<i>Principal Dimension</i>	
Panjang keseluruhan	59,7 m
Diameter dalam	6,2 m
Tinggi sarat air	5,5 m
Tinggi seluruhnya	11,34 m
Displacement menyelam	1390 m <sup>3</sup>
Kedalaman menyelam	250 m
Kec. Waktu menyelam	21 knot
Jarak jelajah	22 NM

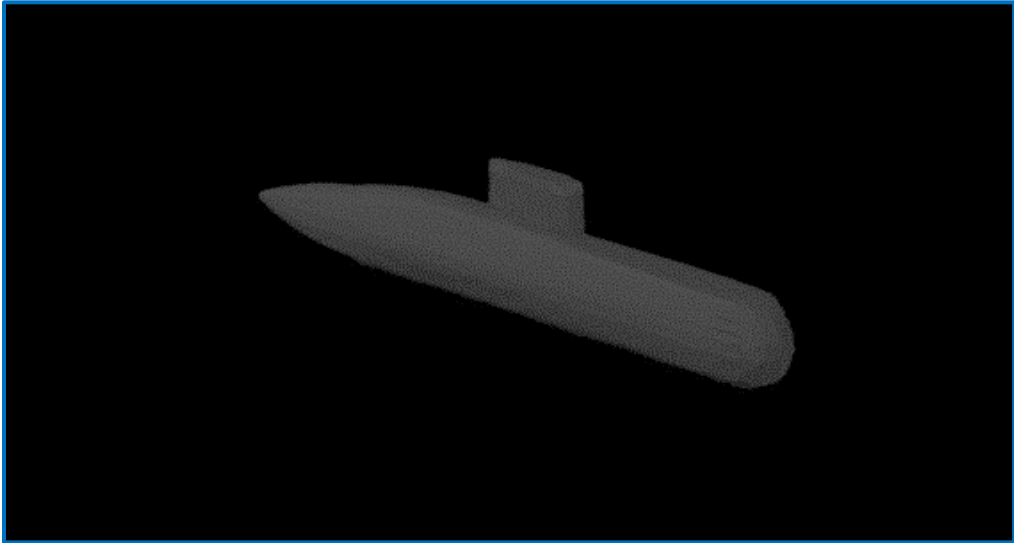
Data Propeller/Baling baling	
Diameter	3,28 m
Putaran maks	200 rpm

Data Motor DC	
Jumlah	1 buah
Type	DC Shunt 380 Volt DC
Daya	2 x 1850 kW pada 200 rpm
Konstruksi	dibuat dobel jangkar

Data Generator	
Daya	480 kW pada 1500 rpm
Tegangan	hingga 340 V

Data Baterai	
Jumlah	480 cell dibagi 4 grup
Tegangan	2-3 volt / cell
Kapasitas	10260 AH
Dimensi	(1421 x 290 x 450)mm <sup>3</sup>
Berat	2 kg

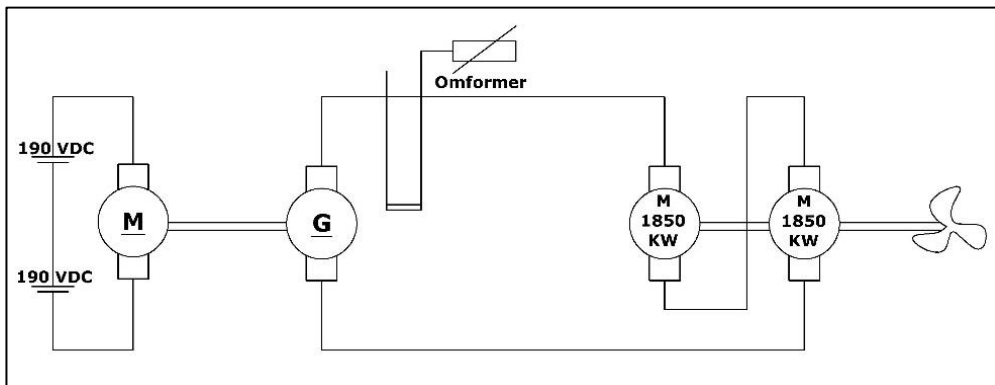
## 2. Model wahana bawah air



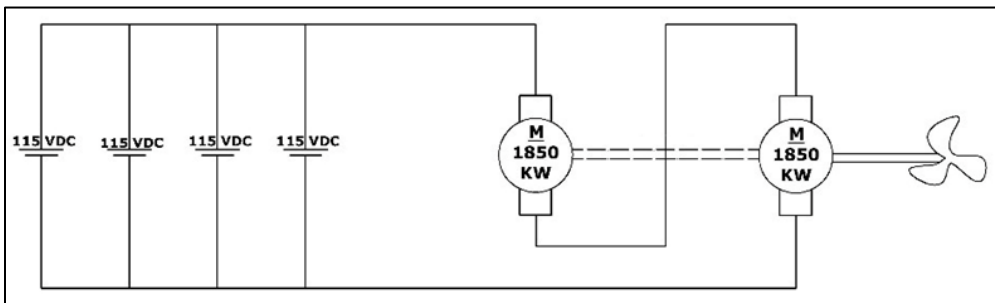
Gambar diatas merupakan model wahana bawah air yang digunakan. Pemodelan tersebut dikerjakan melalui software AutoCAD untuk mencari nilai luasan permukaan basah.

### 3. Gambar skematik rangkaian propulsi

Rangkaian propulsi menggunakan ohmformer:



Rangkaian propulsi tanpa menggunakan ohmformer:

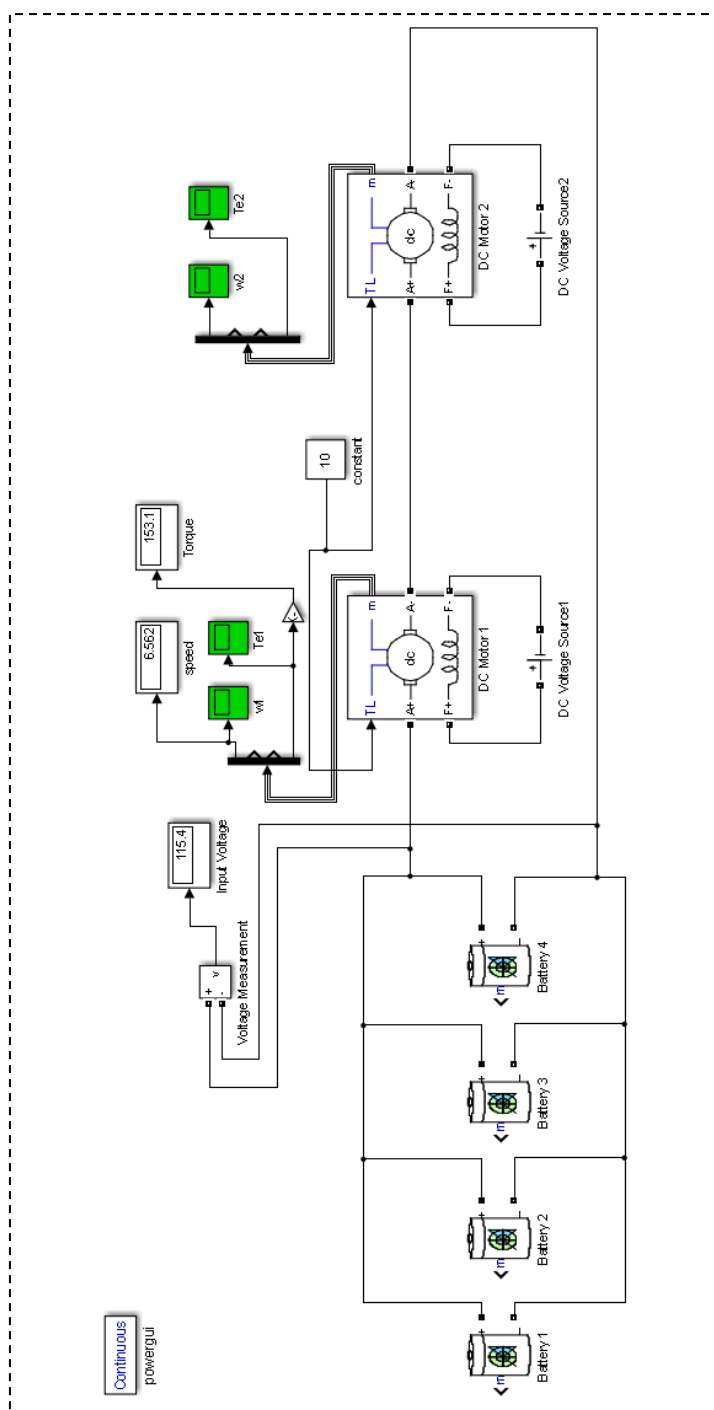






#### 4. Gambar rangkaian propulsi pada SimulinkMATLAB

Rangkaian propulsi tanpa menggunakan ohmformer:



## 5. Hasil simulasi rangkaian

Rangkaian menggunakan ohmformer

Nilai Input		Nilai Output		
Torsi kapal	Tegangan masuk ke motor	Putaran motor		Torsi Motor
(kNm)	(Volt)	(rad/s)	(rpm)	(kNm)
100	10	0.56	5.348	153.7
100	20	1.13	10.791	153.7
100	30	1.69	16.138	153.7
100	40	2.26	21.581	153.7
100	50	2.83	27.025	153.7
100	60	3.41	32.563	153.7
100	70	3.97	37.911	153.7
100	80	4.54	43.354	153.7
100	90	5.11	48.797	153.7
100	100	5.68	54.240	153.7
100	110	6.25	59.683	153.7
100	120	6.82	65.126	153.7
100	130	7.39	70.569	153.7
100	140	7.96	76.012	153.7
100	150	8.53	81.455	153.7
100	160	9.1	86.899	153.7
100	170	9.67	92.342	153.7
100	180	10.24	97.785	153.7
100	190	10.81	103.228	153.7
100	200	11.38	108.671	153.7
100	210	11.95	114.114	153.7
100	220	12.52	119.557	153.7
100	230	13.09	125.000	153.7
100	240	13.66	130.443	153.7
100	250	14.23	135.886	153.7
100	260	14.8	141.330	153.7
100	270	15.37	146.773	153.7
100	280	15.94	152.216	154
100	290	16.51	157.659	154
100	300	17.08	163.102	154
100	310	17.65	168.545	154

Nilai Input		Nilai Output		
Torsi kapal	Tegangan masuk ke motor	Putaran motor		Torsi Motor
(kNm)	(Volt)	(rad/s)	(rpm)	(kNm)
100	320	18.22	173.988	154
100	330	18.78	179.336	154
100	340	19.35	184.779	154

## 5. Hasil simulasi rangkaian

Rangkaian tanpa menggunakan ohmformer

Nilai Input		Nilai Output			
Torsi Kapal	Baterai	Tegangan masuk ke motor	Putaran Motor		Torsi Motor
(kNm)	%	Volt	Rad/s	RPM	(kNm)
100	100%	115	6.562	62.662	153.1
100	90%	107	6.081	58.069	153.1
100	80%	107	6.076	58.022	153.1
100	70%	107	6.070	57.964	153.1
100	60%	107	6.063	57.897	153.1
100	50%	107	6.052	57.792	153.1
100	40%	106	6.036	57.640	153.1
100	30%	106	6.010	57.391	153.1
100	20%	104.8	5.970	57.009	153.1
100	10%	102.0	5.798	55.367	153.1
100	5%	96.4	5.480	52.330	153.1

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kota Batam Provinsi Kepulauan Riau pada tanggal 21 Agustus 1993. Penulis dilahirkan oleh pasangan suami istri Alm. Muhammad Adam dengan Alm. Misnawiyah. Sejarah pendidikan penulis berawal dari SDN 007 Tiban, Batam dilanjutkan ke jenjang jenjang berikutnya SMPN 3 Batam, SMAN 1 Batam, dan meneruskan ke jenjang pendidikan S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya pada Departemen Teknik Sistem Perkapalan dengan NRP 4212100042. Penulis mengambil bidang studi *Marine Electrical and Automation System* (MEAS) dalam pengerjaan skripsi. Semasa perkuliahan, penulis sempat aktif berorganisasi dengan menjadi Ketua Umum organisasi daerah Kerukunan Pelajar Mahasiswa Kepulauan Riau (KPMKR) Surabaya, menjadi *grader* praktikum di Laboratorium *Marine Electrical and Automation System* (MEAS) serta menjadi anggota Tim Kreatif Himpunan Mahasiswa Departemen Sistem Perkapalan.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*